



DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO
Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

**ESTUDIO DE LA RELACION ENTRE FRUSTRACIÓN,
ENTUSIASMO INSTANTÁNEO Y ENTUSIASMO DE LARGO
PLAZO EN LA SOLUCIÓN DE UNA ACTIVIDAD
COGNITIVA DIFERENCIADA
Medida a través de una interfaz cerebro-computadora.**

Imelda Latapie Venegas

Tesis para optar por el grado de Doctora en Diseño
Línea de Investigación: Nuevas Tecnologías

Miembros del Jurado:

Dr. Lorenzo Miguel Ángel Herrera Batista
Director de la tesis

Dr. Eduardo de la Garza Vizcaya
Dra. María Aguirre Tamez
Dr. Emilio Martínez de Velasco y Arellano
Dra. Mercedes Leticia Sánchez Ambriz

México D.F.
Agosto de 2013

Para Arturo Landau
que tu luz me inspire siempre y tu risa ilumine mi camino...

AGRADECIMIENTOS:

Quiero expresar mi gratitud a quienes con su apoyo contribuyeron en las diferentes etapas de esta investigación.

Ruth y José Cielak

University of the People, por la oportunidad de formarme en el área de las Ciencias de la Computación.

El Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal, por el apoyo otorgado de Agosto del 2010 a Enero de 2011.



Y a todas las personas que me han ayudado en la realización de este proyecto.

Sinopsis

La digitalización de contenidos educativos, el desarrollo de aplicaciones multimedia educativas y la proliferación de entornos virtuales de aprendizaje plantean al diseñador un reto, ya que no hay evidencia de que el aprendizaje con ayuda de estas tecnologías sea más efectivo que en el salón de clases tradicional.

Las reacciones del usuario ante los estímulos (niveles de atención, frustración, carga cognitiva o expresiones faciales, por mencionar algunos) no son percibidas o registradas, con lo que se pierde información valiosa para diseñar sistemas que apoyen el aprendizaje.

El objetivo de esta investigación consiste en generar conocimiento aplicable al diseño de sistemas interactivos a través de un experimento que pretende aclarar la relación que existe entre el nivel de complejidad de una tarea y las reacciones que ante ella presenta el usuario (la frustración, el entusiasmo instantáneo y el entusiasmo de largo plazo).

Abstract:

There is a trend to digitize course contents, develop multimedia materials for education and create virtual learning environments. Designers and developers face a challenge, since there is no evidence that cyberlearning is more effective than the traditional classroom.

The reactions of user to screen and multimedia stimuli (levels of attention, frustration, cognitive load, or facial expressions, to name a few) are not perceived or registered. Valuable information to design systems that support learning is lost.

This research aims to generate knowledge relevant to interactive systems design through an experiment which aims to clarify the relationship between a task's level of complexity and user's reactions to it (frustration, instantaneous excitement and long-term excitement).

INDICE

<i>Dedicatoria</i>	<i>i</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>ii</i>
<i>Sinopsis</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Índice</i>	<i>v</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>ix</i>
<i>Índice de Tablas</i>	<i>xii</i>

INTRODUCCIÓN	1
--------------	---

CAPITULO 1: EL CEREBRO

1.1 Introducción	7
1.2 Generalidades	7
1.2.1 Glías y neuronas	11
1.2.2 Áreas y funciones cerebrales	19
1.3 Neuroimagen	21
1.3.1 Neuroimagen estructural	23
1.3.1.1 Tomografía axial computarizada	23
1.3.1.2 Resonancia magnética	24
1.3.2 Neuroimagen funcional	24
1.3.2.1 Resonancia magnética funcional	25
1.3.2.2 Tomografía por emisión de positrones	25
1.3.2.3 Tomografía por Emisión de Fotón único	26
1.3.2.4 Magnetoencefalografía	26
1.3.2.5 Electroencefalografía	27
1.3.2.5.1 Sistema Estándar Internacional 10-20	30
1.3.2.5.2 Tipos de Oscilaciones EEG	32
1.3.2.5.2.1 Oscilaciones Delta (δ)	32
1.3.2.5.2.2 Oscilaciones Teta (θ)	32
1.3.2.5.2.3 Oscilaciones Alfa (α)	33
1.3.2.5.2.4 Oscilaciones Beta (β)	34

1.3.2.5.2.5. Oscilaciones Gama (γ)	34
1.3.2.2.5.3 Artefactos fisiológicos	35
1.4 Conclusiones parciales	35
CAPITULO II: MEMORIA, ATENCIÓN, EMOCIÓN Y CARGA COGNITIVA	
2.1 Introducción	38
2.2 Memoria	38
2.2.1 La memoria desde la perspectiva de la Psicología	43
2.3 Atención	46
2.4 Emoción	49
2.5 Carga cognitiva	51
2.5.1 Carga cognitiva y carga mental	51
2.5.2 Medición de la carga cognitiva	52
2.5.3 Características neurológicas de la sobrecarga cognitiva	54
2.6 Conclusiones parciales	55
CAPITULO III: LA INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADORA	
3.1 Introducción	58
3.2 Características generales	59
3.3 Las opciones de interfaces cerebro-computadora	60
3.4 El dispositivo <i>EPOC^{MR}</i>	64
3.4.1 Hardware	65
3.4.2 Software	66
3.4.3 Algunas limitaciones para la investigación	74
3.4.4. Posibles aplicaciones de esta tecnología	76
3.5 Conclusiones parciales	77
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	
4.1 Antecedentes	80
4.2 Planteamiento y delimitación del problema	80

4.3 Preguntas de investigación	81
4.4 Objetivo específico	82
4.5 Justificación	82
4.6 Definición de la investigación	82
4.7 Las Hipótesis	82
4.8 Las Variables	83
4.9 Planteamiento del experimento	84
4.10 La muestra	84
4.11 Conclusiones parciales	86
 CAPITULO V: RESULTADOS	
5.1 Introducción	88
5.2 Procedimiento para la recolección de datos	88
5.2.1 Participantes	90
5.2.2 Herramientas de apoyo	91
5.2.2.1 <i>ArduinoTM</i> : Hardware libre	91
5.2.2.2 <i>Arduino Uno</i>	92
5.2.2.3 <i>ProcessingTM</i> y <i>ArduinoTM</i> : Software libre	93
5.2.3 La prueba: un laberinto	94
5.2.3.1 La base móvil del laberinto	95
5.2.3.2 El programa en <i>ArduinoTM</i>	98
5.2.3.3 El programa en <i>ProcessingTM</i>	101
5.2.3.4 Los laberintos	102
5.2.4 Instrumentos de medición	105
5.2.4.1 Procedimiento	106
5.2.4.2 Administración de datos	108
5.3 Los datos y las pruebas estadísticas	114
5.5 Presentación de Resultados	130
5.6 Conclusiones parciales	132

CONCLUSIONES	135
BIBLIOGRAFÍA	140
ENLACES ADICIONALES	149
ANEXO A	151
CURRICULUM VITÆ	175

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes vistas del encéfalo.....	8
Figura 2. Hemisferio izquierdo del encéfalo.....	9
Figura 3. Sección sagital del hemisferio izquierdo del encéfalo.....	10
Figura 4. Tipos principales de células gliales	12
Figura 5. Componentes de la neurona.....	13
Figura 6. Componentes de la neurona.....	16
Figura 7. Algunos tipos de neuronas.....	18
Figura 8. Lóbulos frontal, parietal, temporal y occipital del hemisferio cerebral izquierdo del encéfalo.....	20
Figura 9. Equipos utilizados para la obtención de imágenes del cerebro.....	22
Figura 10. Comparación de las técnicas de estudio funcional cerebral en función de su resolución temporal, espacial y grado de invasividad.	27
Figura 11. Cuatro tipos de electrodos para EEG.....	30
Figura 12. Sistema Estándar Internacional 10-20.	31
Figura 13. Ubicación y nomenclatura de los electrodos intermedios a distancia del 10%.	31
Figura 14. Comportamiento de las ondas delta en un segundo	32
Figura 15. Comportamiento de las ondas teta en un segundo.....	33
Figura 16. Comportamiento de las ondas alfa en un segundo.....	33
Figura 17. Comportamiento de las ondas beta en un segundo.	34
Figura 18. Comportamiento de las ondas gamma en un segundo.....	34
Figura 19. Vista del lado derecho del cerebro mostrando las regiones involucradas con los distintos tipos de carga cognitiva.....	55
Figura 20. Estructura de una interfaz cerebro-computadora.	60
Figura 21. <i>MindWave^{MR}</i> y <i>MindSet^{MR}</i> de la compañía <i>Neurosky</i>	62
Figura 22. <i>ForceTrainer^{MR}</i> y <i>MindFlex^{MR}</i>	62
Figura 23. <i>Nia^{MR}</i> de la compañía <i>OCZ Technology</i>	63
Figura 24. <i>B-Alert^{MR}</i> de la compañía <i>Advanced Brain Monitoring</i>	63
Figura 25. <i>EPOC^{MR}</i> de la compañía <i>Emotiv</i>	64
Figura 26. Posicionamiento de la interfaz <i>EPOC^{MR}</i> de la compañía <i>Emotiv</i>	65
Figura 27. Vista superior. Esquema de ubicación de los sensores de la interfaz <i>EPOC^{MR}</i> de <i>Emotiv</i> según el Sistema Estándar Internacional 10-20.....	66

Figura 28. Panel de la suite <i>Affectiv^{MR}</i> de la interfaz <i>EPOC^{MR}</i> de <i>Emotiv</i>	67
Figura 29. Panel de entrenamiento de la suite <i>Cognitiv^{MR}</i> de la interfaz <i>EPOC^{MR}</i> de <i>Emotiv</i>	68
Figura 30. Panel de ajuste de la suite <i>Expressiv^{MR}</i> de la interfaz <i>EPOC^{MR}</i> de <i>Emotiv</i>	68
Figura 31. <i>Emotiv EmoEngineTM</i>	69
Figura 32. Panel de control de <i>EmoKeyTM</i>	70
Figura 33. Ventana de configuración de <i>EmoKeyTM</i>	70
Figura 34. Panel de control de <i>EmoComposerTM</i> en el modo Interactivo	71
Figura 35. Panel de control de <i>EmoComposerTM</i> en el modo <i>EmoScriptTM</i>	72
Figura 36. Panel de monitoreo de los 14 canales de <i>TestBenchTMv1.5</i>	73
Figura 37. Esquema de ubicación de los sensores de la interfaz <i>EPOC^{MR}</i> de <i>Emotiv</i> según el Sistema Estándar Internacional 10-20 y su esperada relación con funciones cognitivas.	75
Figura 38. Imágenes del escáner cerebral <i>Mynd^{MR}</i> de la compañía <i>NeuroFocus</i>	77
Figura 39. Rango y promedio de las edades.	85
Figura 40. Equipo del primer módulo de trabajo para la interacción del sujeto con el material de prueba.	89
Figura 41. Esquema de transmisiones y registro de datos.	89
Figura 42. Volante de invitación para reunir voluntarios.	90
Figura 43. Logotipo del hardware libre <i>Arduino</i> y del software libre <i>Processing</i>	92
Figura 44. Vistas anterior y posterior de la tarjeta <i>Arduino UNO</i>	92
Figura 45. Las partes de la tarjeta <i>Arduino UNO</i>	93
Figura 46. Esquema y medidas de la plataforma del laberinto	95
Figura 47. Imágenes del movimiento de la base del laberinto	96
Figura 48. Imagen de la base del laberinto.	96
Figura 49. La conexión de la tarjeta <i>Arduino</i>	97
Figura 50. Interfaz de control inicial para el movimiento del Laberinto.	100
Figura 51. Opción de interfaz de control para el movimiento del Laberinto con el teclado	100
Figura 52. Interfaz de control final para el movimiento del Laberinto.	101
Figura 53. Esquema de uno de los laberintos sencillos.	103
Figura 54. Par de laberintos sencillos. Laberinto A y laberinto B.	103
Figura 55. Esquema de uno de los laberintos complejos.	104
Figura 56. Par de laberintos complejos. Laberinto C y laberinto D.	104
Figura 57. Laberinto funcionando	105
Figura 58. Laberinto Rectangular Sencillo (A). De la suite <i>AffectivTM</i> :	108
Figura 59. Laberinto Rectangular Sencillo (B).	109

Figura 60. Laberinto Circular Sencillo (C).	109
Figura 61. Laberinto Circular Complejo (D).	109
Figura 62. Archivo en formato .edf con los registros de la herramienta <i>TestBenchTM</i> para uno de los laberintos.	110
Figura 63. Imagen parcial del Archivo <i>WordTM</i> en formato .doc con los registros de la herramienta <i>EmoKeyTM</i> para uno de los laberintos.....	111
Figura 64. Programación de la herramienta <i>EmoKeyTM</i>	112
Figura 65. Retícula Segundos vs. Intensidad para obtener datos cuantitativos de las imágenes de los estados emocionales.	113
Figura 66. Datos numéricos de tiempo/intensidad de tres estados emocionales (frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo).	113
Figura 67. Análisis estadístico de los datos en R.	113
Figura 68. Diagramas de caja de cada laberinto para la variable frustración.....	118
Figura 69. Diagramas de caja de cada laberinto para la variable entusiasmo instantáneo.....	118
Figura 70. Diagramas de caja de cada laberinto para la variable entusiasmo de largo plazo.....	119
Figura 71. Diagramas de caja de cada laberinto y de cada variable.....	119
Figura 72. Las variables dependientes de las pruebas B y D.	122
Figura 73. Las variables dependientes de las pruebas C y D.	123
Figura 74. Niveles de frustración del Laberinto A vs. laberinto D	127
Figura 75. Niveles de frustración del Laberinto A vs. laberinto D	128
Figura 76. Niveles de entusiasmo de largo plazo del Laberinto A vs. laberinto D	129
Figura 77. Comportamiento de las variables en cada laberinto.	131
Figura 78. Comportamiento del entusiasmo instantáneo y el entusiasmo de largo plazo en cada laberinto.	132

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Oscilaciones u ondas electroencefalográficas.....	35
Tabla 2.- Clasificación de la memoria según Squire (1986).....	41
Tabla 3.- Clasificación de los sistemas de memoria según Tulving y Schacter (1990).....	42
Tabla 4.- Sistemas y tipos de atención.....	49
Tabla 5.- Características técnicas de la edición de investigación y el software <i>TestBench</i> TM	73
Tabla 6.- Distribución de grupos de canales y su asociación con los lóbulos cerebrales y algunas funciones cognitivas.....	74
Tabla 7.- Datos generales de los voluntarios que participaron en el experimento.....	85
Tabla 8.- Tiempo y Media Aritmética de los estados emocionales de cada sujeto al resolver el laberinto A.....	114
Tabla 9.- Tiempo y Media Aritmética de los estados emocionales de cada sujeto al resolver el laberinto B.....	115
Tabla 10.- Tiempo y Media Aritmética de los estados emocionales de cada sujeto al resolver el laberinto C.....	115
Tabla 11.- Tiempo y Media Aritmética de los estados emocionales de cada sujeto al resolver el laberinto D.....	116
Tabla 12.- Mediciones agrupadas por variable.....	124
Tabla 13.- Medias de las frustración de los cuatro laberintos.....	125
Tabla 14.- Medias del entusiasmo instantáneo de los cuatro laberintos.....	125
Tabla 15.- Medias del entusiasmo de largo plazo de los cuatro laberintos.....	125
Tabla 16.- Coeficientes de correlación para cada variable.....	126
Tabla 17.- Media de las variables de cada laberinto.....	130

INTRODUCCIÓN

La evolución de la tecnología, el incremento en la cantidad y la velocidad de la transmisión de datos y el almacenamiento virtual de datos han sido factores de impulso para la digitalización de contenidos educativos, el desarrollo de aplicaciones multimedia educativas y la proliferación de entornos virtuales de aprendizaje.

No hay duda que el entorno tradicional de enseñanza está en constante transformación al incorporar los avances y novedades tecnológicas, como pueden ser las redes sociales, las conferencias virtuales, los videos interactivos, o los teléfonos móviles y las tabletas digitales.

Conocer el efecto que las herramientas tecnológicas, la multimedia y la interacción del usuario con los contenidos educativos tienen en el aprendizaje es una cuestión compleja porque además de ser una modalidad relativamente nueva, existe una diversidad en la manera de entregar y recuperar la información, y los criterios utilizados para la digitalización de los contenidos suele variar. Así, existen opciones que ofrecen parte de su contenido en forma de clases grabadas en video, en donde el usuario solamente puede pausar, adelantar o repetir la transmisión y que se complementan con otras actividades (como los foros de discusión); o los módulos educativos con videos interactivos que de manera regular introducen una pregunta o problema que el usuario debe resolver (la respuesta es evaluada al momento y la retroalimentación es proporcionada antes de continuar con la transmisión). Pero a la vez existen otras opciones, como los tutoriales digitales y las aplicaciones multimedia educativas en donde el usuario interactúa solamente con el sistema, por mencionar algunas.

El uso de los medios (sonidos, animaciones, etc.), la distribución de la información en pantalla y la manera en que el usuario puede acceder a los contenidos (mayor o menor libertad del usuario para elegir lo que desea visualizar de la totalidad del contenido) se agregan a los factores que dan variedad a la enseñanza digital.

Diseñadores, desarrolladores y docentes son sólo algunos de los participantes en el desarrollo de estos contenidos. A pesar de que Mayer (2005) propone una serie de

principios para el diseño de sistemas multimedia educativos, resulta difícil saber si un material didáctico multimedia apoya el proceso o tarea que el usuario está realizando.

Creemos que una de las razones es que por lo general, el sistema no recibe información relevante del usuario durante la entrega del contenido; es decir, las reacciones del usuario ante los estímulos (niveles de atención, frustración, carga cognitiva o expresiones faciales, por mencionar algunos) no son percibidas o registradas. De esta manera se pierde gran cantidad de información valiosa para diseñadores y desarrolladores, que podrían utilizarla para que el sistema actuara ante las acciones y reacciones de cada usuario.

Es recomendable cuestionarnos el papel del Diseño ante las herramientas tecnológicas, los contenidos educativos y el usuario; tratar de conocer su efectividad para apoyar el aprendizaje. Clark (2010) menciona que las investigaciones de la neurociencia y la cognición en el aprendizaje muestran que el ciberaprendizaje (*“aprendizaje a través de los ordenadores en red y las tecnologías de la comunicación”* (NSF, 2008, p.10)) no es más efectivo que el aprendizaje en el salón de clases, que ajustar la instrucción para los diferentes tipos de aprendizaje tampoco lo incrementan; y que gran parte de nuestro aprendizaje es automático (no consciente) para superar los límites de la memoria de trabajo que está limitada al procesamiento de 3 ± 1 elementos (Cowan, 2001 en Clark, 2010, p.7).

Como diseñadores y desarrolladores es conveniente considerar que los procesos automáticos tienen un efecto importante en el aprendizaje, en la solución de problemas, el pensamiento complejo y en la motivación. La tecnología nos ofrece nuevas herramientas que pueden utilizarse para monitorear el desempeño y las reacciones del usuario a los estímulos presentados. La integración del sentido del tacto, a través de sensores hápticos, detectores de movimiento para controlar acciones o los sensores biométricos son algunos ejemplos. Entre los más novedosos dispositivos, se encuentran las interfaces cerebro-computadora que permiten la comunicación directa del usuario con la computadora a través de la interpretación de la actividad electromagnética del cerebro.

Los estados emocionales, las expresiones faciales, los niveles de atención y frustración son algunos de los elementos que pueden ser monitoreados por las interfaces cerebro-computadora.

La inquietud por conocer las posibilidades de adaptación de nuevas tecnologías comerciales del campo del entretenimiento al diseño de material multimedia educativo y lúdico nos llevó a seleccionar una interfaz cerebro computadora (*EPOCTM* de *Emotiv*) como herramienta de exploración, ya que sus características ofrecen la posibilidad de considerar las respuestas del usuario a los estímulos para convertirlos en acciones.

Consideramos importante conocer la utilidad en los sistemas interactivos de este tipo de interfaces como gestoras de contenidos e interacción, con el fin de favorecer la atención y la memoria y consecuentemente, el aprendizaje.

El objetivo específico de este proyecto de investigación consiste en generar conocimiento aplicable al diseño de sistemas interactivos a través de un experimento que pretende aclarar la relación que existe entre el nivel de complejidad de una tarea y las reacciones que ante ella presenta el usuario (la frustración, el entusiasmo instantáneo y el entusiasmo de largo plazo).

Se plantea como hipótesis que el nivel de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo en la solución de actividades cognitivas diferenciadas dependen del nivel de complejidad de la tarea. Se plantea también que existe una correlación entre los niveles de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo.

El proyecto se dividió en cinco partes. La primera presenta los conceptos generales del cerebro y su funcionamiento, de la estructura y comportamiento de las neuronas así como una descripción de las distintas técnicas de obtención de información del cerebro, haciendo énfasis en la electroencefalografía, por ser esta la técnica utilizada en nuestro experimento.

La segunda parte hace una revisión de los conceptos de memoria, atención, emoción, y carga cognitiva así como las partes funcionales del cerebro involucradas en ellos. Se da especial atención a la carga cognitiva, sus características neurológicas y las formas de medirla. Se examina el papel que juega la memoria en la codificación y recuperación de la información, en la influencia que la emoción tiene en estos procesos, y en la importancia de la atención en el almacenamiento de la información.

En la tercera parte se abordan las interfaces cerebro-computadora y sus características, las opciones comerciales disponibles en el mercado, y se describe el dispositivo seleccionado

para realizar el experimento. También se incluye una reflexión de los campos que podrían beneficiarse con esta tecnología y la asociación de algunas funciones cognitivas con el hardware seleccionado para el experimento.

La metodología de trabajo se aborda en la cuarta parte que describe los antecedentes, el planteamiento y la delimitación del problema, formula las preguntas de investigación y las hipótesis, y define la investigación, las variables, el tipo de experimento y la muestra.

Los resultados obtenidos se analizan en la quinta parte, que ahonda en la recolección de datos y los instrumentos de medición; hace una introducción al software y hardware libre (*Processing* y *Arduino*) que fueron utilizados en el experimento. En esta sección las hipótesis nulas se ponen a prueba y se realiza un análisis estadístico de los datos recolectados en el experimento. Cada sección presenta un conjunto de conclusiones parciales. Las conclusiones generales conforman la última parte de este proyecto.

El Anexo A incluye todos los datos y mediciones obtenidas durante las pruebas para los lectores interesados en profundizar y/o extender el análisis de los mismos.

Los datos utilizados en el análisis estadístico de esta investigación pueden ser obtenidos con el software de la versión comercial de la interfaz.

La información relativa a la electroencefalografía digital (los archivos con formato *edf*) que abarcan las mediciones de cada sensor del dispositivo así como las oscilaciones EEG no se incluyen en este trabajo, ya que su lectura requiere de un software adicional que el proveedor ofrece si se adquiere la licencia de investigación. Queremos destacar que es posible realizar investigaciones con la versión comercial más accesible de la interfaz cerebro computadora seleccionada y dejar en la mente del lector la posibilidad de profundizar en los datos que se pueden obtener con esta tecnología si se adquiere la licencia mencionada con anterioridad.

A pesar de la importancia de la información adicional que brindan estos archivos, éstos no son parte del objetivo de la investigación, ya que el trabajo está enfocado hacia los diseñadores, y la interpretación de encefalogramas no está incluida entre las habilidades esperadas en esta profesión.

Esperamos que el presente trabajo brinde a diseñadores y desarrolladores una introducción a las interfaces cerebro-máquina, que logre incentivar la investigación alrededor de las respuestas no conscientes del usuario y despierte el interés de otros investigadores en profundizar en el tema, a través de experimentos e investigaciones adicionales.

CAPÍTULO I: EL CEREBRO

CAPITULO 1: EL CEREBRO

1.1 Introducción

Este proyecto utiliza una interfaz cerebro computadora como herramienta de medición que consta de múltiples sensores que se acomodan en distintas partes del cerebro y registran e interpretan la actividad eléctrica de las neuronas a través de la técnica de electroencefalografía.

Este capítulo ofrece una noción general del cerebro, de sus partes y funciones generales, de la estructura y comportamiento de las neuronas así como una descripción de las distintas técnicas de obtención de información del cerebro, haciendo énfasis en la electroencefalografía. La información tiene la finalidad de brindar al diseñador una visión más completa de los elementos con los que trabaja la herramienta tecnológica seleccionada.

1.2 Generalidades

El cerebro¹ es el órgano más complejo del cuerpo humano, controla todas las actividades del cuerpo como la respiración, el pensamiento, las emociones, la memoria, el aprendizaje, el equilibrio y el movimiento entre muchas otras.

Existen varias maneras de clasificar las partes del cerebro para facilitar su estudio, y estas se basan en diferentes criterios, como puede ser el evolutivo o el funcional. Cada una de ellas aporta un enfoque particular. Para los propósitos de este proyecto, abordaremos el estudio del cerebro y las neuronas de una manera general con la intención que el lector adquiera los conocimientos básicos que le permitirán dar seguimiento a la investigación realizada, sin verse inmerso en la complejidad de términos y estructuras más propias de un estudio neurológico, que de un proyecto de diseño. El lector que desee profundizar en este tema, puede consultar las fuentes referidas en la bibliografía.

¹ "El término "cerebro" (supratentorial o parte frontal) se suele utilizar incorrectamente para referirse a la totalidad del contenido del cráneo, que en realidad se llama encéfalo..." (University of Chicago, 2010).

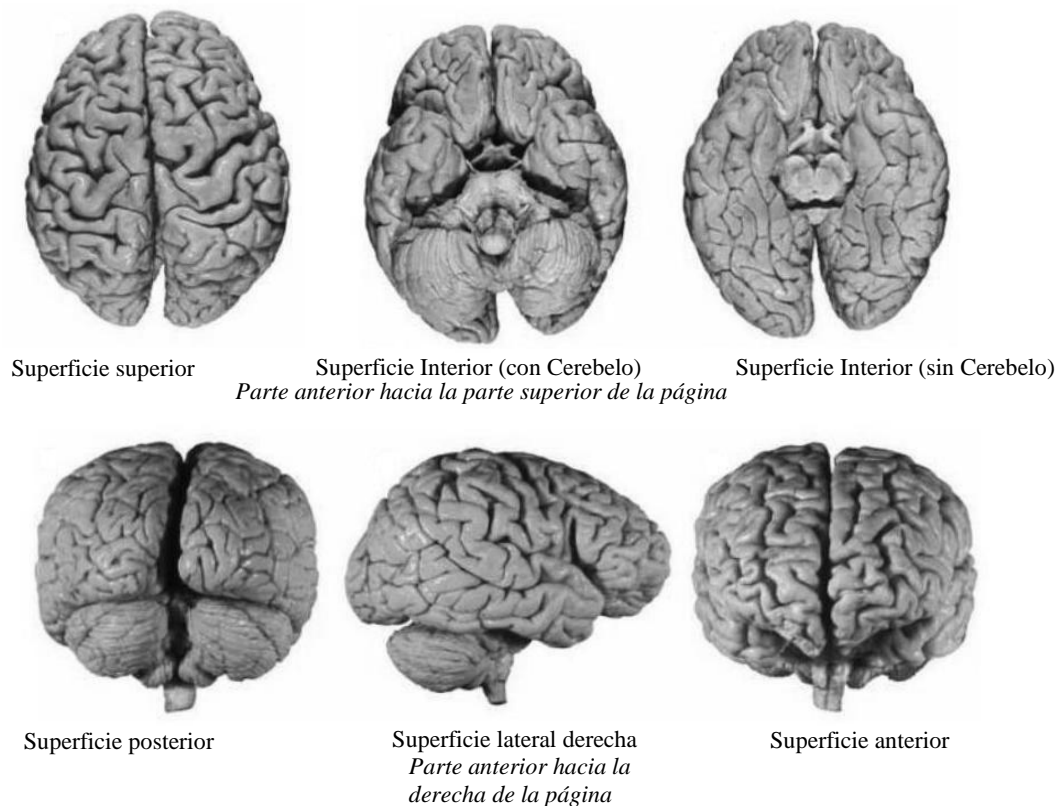


Figura 1. -Diferentes vistas del encéfalo. Imágenes tomadas de Nolte, Angevine, 2009, p.4.

El sistema nervioso se divide en sistema nervioso central (SNC) formado por el encéfalo y por la médula espinal² y sistema nervioso periférico (SNP) formado por nervios que conectan al SNC con estructuras periféricas (Hanes, Raila y Terrell en Haines, 2003).

La médula espinal se encuentra protegida por el hueso que recorre la parte media de la espina dorsal, mientras que el encéfalo está contenido en la cavidad craneal y está protegido por los huesos del cráneo y por tres membranas llamadas meninges³.

El encéfalo se divide en cerebro anterior (o prosencéfalo), cerebro medio (o mesencéfalo) y cerebro posterior (o romboencéfalo). El cerebro anterior⁴ es la parte más voluminosa y

² La médula espinal es el eslabón entre el sistema nervioso periférico (SNP) y el cerebro; transmite a través de 31 pares de nervios raquídeos la información sensitiva (que se origina en el tronco, en las extremidades y en las vísceras), y distribuye impulsos motores a estas áreas (Hanes, Raila y Terrell en Haines, 2003).

³ Las meninges se denominan duramadre (la más externa, que es dura y fibrosa), aracnoides (la intermedia que es transparente y cubre el encéfalo sin introducirse en las circunvoluciones cerebrales) y piamadre (delgada con gran cantidad de pequeños vasos sanguíneos y linfáticos y está unida a la superficie cerebral) (IQB, 2010).

⁴ El cerebro anterior se divide en diencéfalo y telencéfalo. El diencéfalo contiene el tálamo (que se forma a su vez de varias regiones: el hipotálamo, el subtálamo, el epitálamo y el tálamo o tálamo dorsal), el quiasma óptico, la hipófisis, los tubérculos mamilares y la cavidad llamada tercer ventrículo. El telencéfalo está formado por los ganglios basales: núcleos caudado y lenticular que forman el cuerpo estriado, y el cuerpo

compleja del cerebro, contiene el telencéfalo (con la información de la inteligencia, la memoria, la personalidad, la emoción, el habla y la capacidad de sentir y movernos) y se divide en dos grandes mitades (el hemisferio derecho y el hemisferio izquierdo) conectadas entre sí por un haz de fibras nerviosas conocido como el cuerpo calloso, que permite el intercambio de información (Nemours Foundation, (s.f.)).

Cada hemisferio está formado por tres subdivisiones: la corteza cerebral, la sustancia blanca subcortical y los núcleos basales (o ganglios basales) (Haines y Mihailoff en Haines, 2003, p.7). La superficie externa o corteza cerebral cubre toda la superficie de cada hemisferio y está compuesta por varias capas celulares; forma elevaciones (circunvoluciones o giros), separadas por pliegues llamados surcos⁵, que cuando son muy profundas se les conoce como cisuras o fisuras.

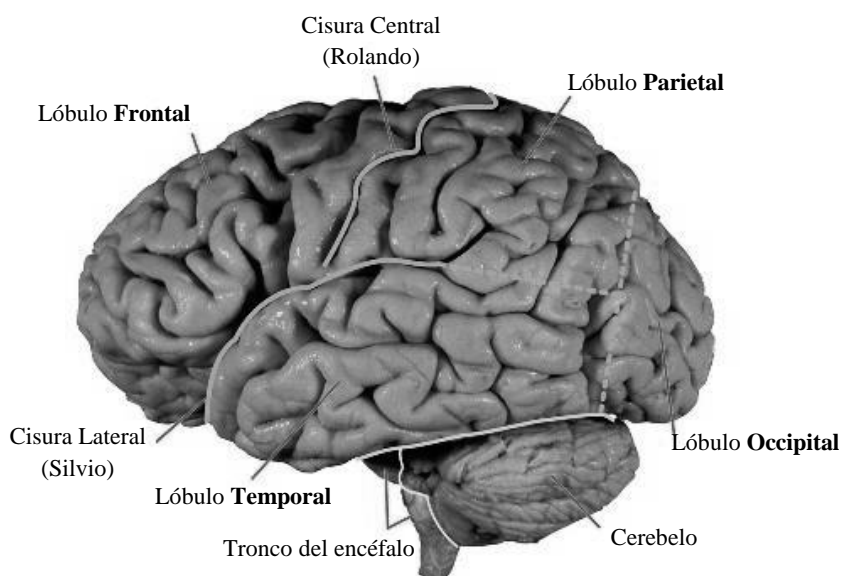


Figura 2.- Hemisferio izquierdo del encéfalo. Imagen tomada y adaptada de: Neuroanatomy <http://ahsmail.uwaterloo.ca/~amarlin/neuroanatomy.html>

amigdalino y el claustró; el rinencéfalo, el hipocampo y el área septal, que forman el sistema límbico; y la corteza cerebral o neocórtex (Pontificia Universidad Javeriana, Hanes, Raila y Terrell en Hanes, 2003).

⁵ Cada circunvolución y surco de la corteza cerebral se le asocia un nombre y muchas se vinculan a funciones específicas.(Hanes, Raila y Terrell en Hanes, 2003,p.5).

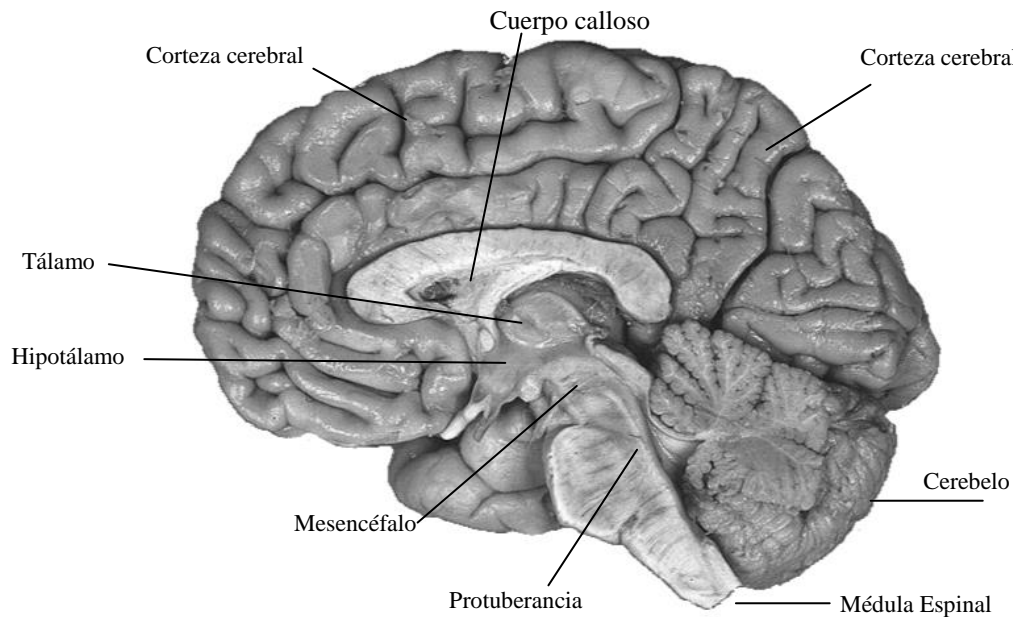


Figura 3.- Sección sagital del hemisferio izquierdo del encéfalo.

Imagen tomada de: http://www.pabloganuzagonzalez.com/portada_noticias/?tag=cerebro

De la disposición de los principales surcos, la corteza cerebral se divide en seis lóbulos⁶ (áreas específicas que procesan diferentes tipos de información): lóbulo frontal, lóbulo parietal, lóbulo temporal, lóbulo occipital, lóbulo límbico y lóbulo de la ínsula⁷ (Pontificia Universidad Javeriana, Nemours Foundation (s.f.), Haines y Mihailoff en Haines, 2003). En este documento, pondremos especial atención a los lóbulos frontal, parietal, temporal y occipital.

En la parte interna del cerebro anterior se ubica el tálamo, el hipotálamo y la hipófisis. Todas las entradas sensoriales, con excepción de las olfativas se asocian con grupos de células del tálamo. El hipotálamo controla el pulso, la sed, el hambre, los patrones de sueño e interviene en la conducta sexual y otros procesos corporales que ocurren en el organismo automáticamente. Controla también la liberación de hormonas de la hipófisis, que influyen

⁶ Bajo un punto de vista no solamente anatómico, Duque Parra, Barco Ríos y Castaño Molina (2001) resaltan una división de siete lóbulos para cada hemisferio cerebral y consideran la existencia de un séptimo lóbulo, el piriforme, relacionado con el olfato y la conducta, entre otros procesos.

⁷ El lóbulo insular o central no es visible sobre la superficie de los hemisferios. Se le relaciona con el ritmo cardíaco, el control de la presión arterial, algunas funciones viscerales (como el gusto), funciones motoras (respiración y la actividad gastrointestinal) y como área motora suplementaria (movimientos macroscópicos del cuerpo, labios, laringe y cara). (Duque Parra, Hernán Moscoso, Devia Cubillos, 2004)

en el crecimiento, el metabolismo, la digestión, la maduración sexual y la respuesta al estrés (Nemours Foundation (s.f.), Hanes, Raila y Terrell en Haines, 2003, p.7).

El cerebro medio (mesencéfalo)⁸ puede dividirse en tres regiones: el techo (o tectum), la calota (o tegmento mesencefálico) y el pedúnculo cerebral. El mesencéfalo conecta al cerebro anterior con el cerebro posterior y coordina la información que sale o llega entre el cerebro anterior y la médula espinal. Está relacionado con la vista, el oído, el movimiento ocular y corporal, la transmisión del dolor y las funciones viscerales (Asociación Alzheimer de Monterrey, Mihailoff, Haines y May en Haines, 2003, p. 190).

El cerebro posterior (o romboencéfalo) engloba el cerebelo⁹, el puente y la médula oblonga. El cerebelo tiene una sustancia gris en su exterior y una sustancia blanca en su interior con una forma arborescente (llamada árbol de la vida). Coordina el movimiento al caminar, la postura, el balance y la coordinación. El puente y la médula oblonga integran el tronco cerebral, éste regula los mensajes cerebrales y controla diversas funciones corporales automáticas (respiración, frecuencia cardíaca, digestión, entre otras) (Asociación Alzheimer de Monterrey, Nemours Foundation (s.f.)).

1.2.1 Glías y neuronas

El sistema nervioso se compone de dos tipos de células que tienen una dependencia funcional entre ellas: la unidad estructural llamada neurona (o célula nerviosa) y las células gliales (o glías) que se intercalan entre las neuronas. Cada neurona recibe, procesa y envía información a otras neuronas o a tejidos efectores. Las glías ayudan a las neuronas a funcionar de manera apropiada: proveen nutrientes, soporte físico y protección. Existen tres tipos principales de células gliales: los *astrocitos*¹⁰ que tienen

⁸ Posee centros reflejos para el movimiento de los ojos, cabeza y cuello en respuesta a estímulos visuales, y para los movimientos de la cabeza en respuesta a estímulos auditivos (Candia, 2009)

⁹ Cerebelo en latín significa “pequeño cerebro”. Esta parte parece una versión a escala del cerebro. (Nemours Foundation (s.f.))

¹⁰ Los astrocitos pueden ser protoplasmáticos (de prolongaciones ramificadas que se encuentran principalmente en la sustancia gris) o fibrosos (en forma de araña, con prolongaciones más largas y más delgadas, y se encuentran primordialmente en la sustancia blanca) (Tovar Franco, 2001).

una forma estrellada (proveen a las neuronas con soporte físico y nutrientes y protegen al SNC de los cambios bruscos manteniendo el equilibrio del espacio extracelular), los *oligodendrocitos* (producen y mantienen la capa de mielina¹¹ de los axones que acelera la conducción neural) y las *microglias* (eliminan las células dañadas y la mielina alterada, forman parte del sistema de defensa del cerebro, con funciones inmunológicas) (Neuroanatomía, 2009, Brailowsky, 1995).

Los astrocitos han sido considerados como células de soporte, sin embargo, investigaciones recientes como la de Oberheim y co-autores (Newsroom, 2009) han revelado la posibilidad de que la capacidad del cerebro humano esté relacionada con la sofisticación de los astrocitos y su complejo poder de procesamiento, ya que el estudio sugiere que son parte del funcionamiento cognitivo superior que nos define como humanos. Los científicos han estudiado la actividad entre las neuronas midiendo la actividad eléctrica, sin embargo, los astrocitos (que son diez veces más abundantes que las neuronas) no emiten señales como las de las neuronas, ellos usan calcio para enviar señales a las neuronas, y estas responden en un intercambio constante de información, por lo que hoy en día se reconoce que los astrocitos son participantes activos en el funcionamiento del cerebro y el procesamiento sensorial (Newsroom, 2009).

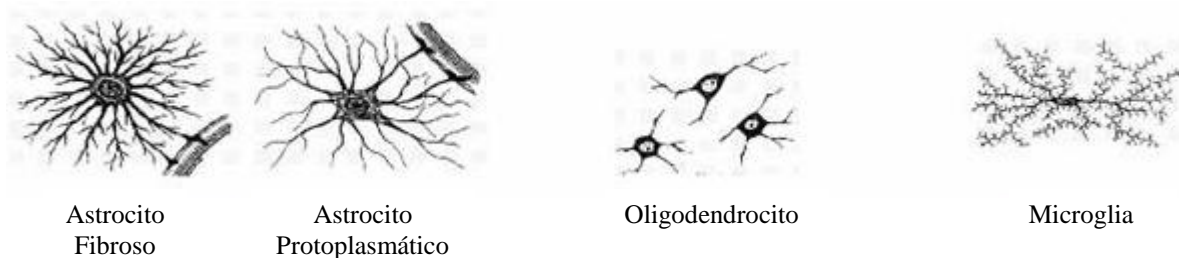


Figura 4.- Tipos principales de células gliales: Astrocitos, Oligodendrocitos y Microglia.
Imagen tomada de Características de la glía, (Neuroanatomía, 2009).

El cerebro tiene dos sistemas de señales que se complementan (uno formado por las neuronas y otro formado por los astrocitos). Son dos redes de comunicación que utilizan lenguajes diferentes. Por un lado una sofisticada red eléctrica incorporada a las neuronas

Estudios recientes han encontrado que las personas tienen astrocitos intralaminares o “*interlaminar astrocytes*” (Newsroom, 2009).

¹¹ La mielina es un material graso compacto que rodea y aísla los axones de algunas neuronas. Garantiza que los impulsos enviados por las fibras nerviosas no se pierdan en el camino y acelera la velocidad de conducción del impulso nervioso. (Asociación Educar y OECD, 2003).

que envía señales a gran velocidad y a distancias muy grandes (como por ejemplo la punta de los dedos de las manos o los pies que sienten el calor o el dolor y el cerebro detecta el peligro, ordenando al cuerpo retirarse de la fuente del estímulo). Por el otro lado, una red mucho más lenta, integrada por los astrocitos que envían señales 10,000 veces más lentas que las neuronas, pero que pueden procesar la información de una manera más sofisticada y recuperar memorias (Newsroom, 2009).

Las neuronas se componen de un cuerpo celular (también llamado soma) que contiene la información genética de la célula y dos tipos de prolongaciones (fibras nerviosas) que parten de él: las dendritas (suelen ser muchas, muy ramificadas cerca del soma y reciben la información de otras neuronas) y el axón o cilindroeje (cada neurona tiene un solo axón que transmite los impulsos a destinos más lejanos, ya que tiene una mayor longitud). Los somas como conjunto forman la sustancia gris del SNC, y los grupos de somas que comparten funciones específicas se llaman núcleos. La sustancia blanca del SNC se forma de haces de axones envueltos en lipoproteína aislante (mielina) (Marrero, 2005, Medical Research Council, 2003 y Hanes, Raila y Terrell en Haines, 2003, p. 5).

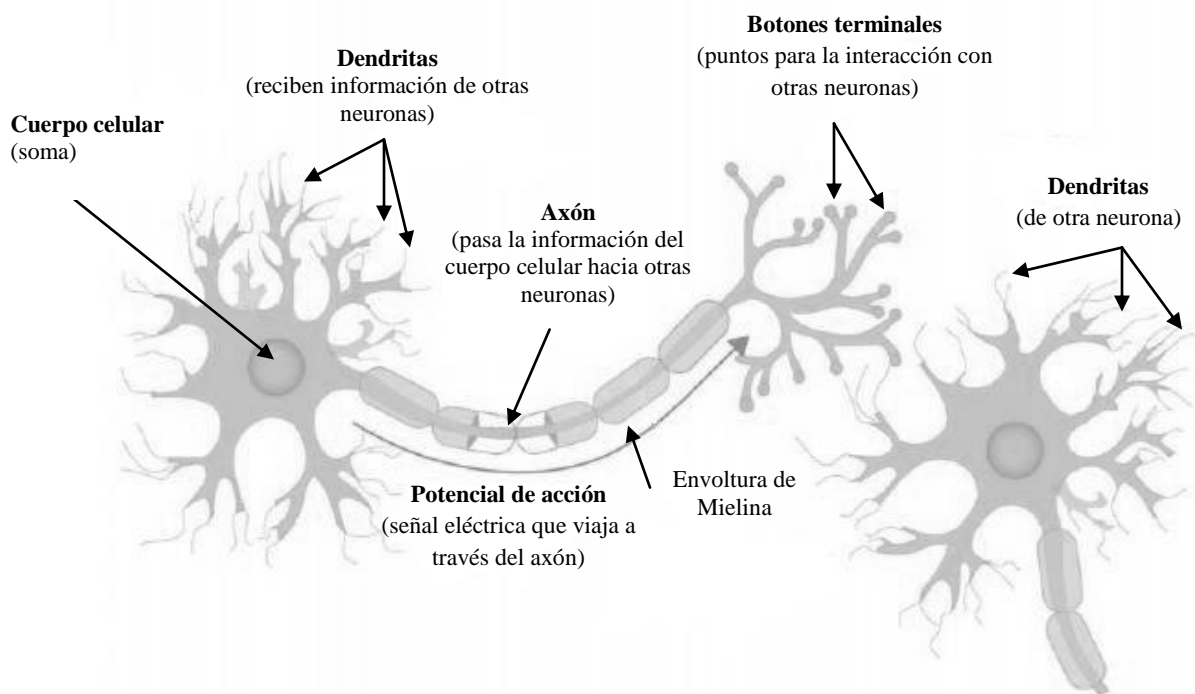


Figura 5.- Componentes de la neurona. Imagen tomada de *Introduction to psychology*, (Stangor, 2010, p.63).

Las neuronas que se relacionan funcionalmente forman estructuras, que a su vez se combinan para formar estructuras mayores (Medical Research Council ,2003, Hutchins, Naftel y Ard, en Haines, 2003 y Haines, Raila y Terrell en Haines, 2003, p.4).

El cerebro humano contiene aproximadamente 100,000 millones de neuronas y cada una de ellas puede establecer mil contactos terminales, por lo que el número de conexiones entre neuronas se estima entre 10^{14} y 10^{15} (Rockhold, en Haines, 2003, p.58).

La *sinapsis* es el punto o espacio donde la prolongación de una neurona (generalmente donde termina el axón o terminal axónica) se comunica con otra neurona (con una dendrita o con una célula efectora glandular o muscular) (Medical Research Council, 2003, Hutchins, Naftel y Ard, en Haines, 2003). No es un contacto directo. La comunicación entre neuronas se realiza sin que estas se toquen, pues existe una separación infinitesimal entre ambas células (llamada hendidura sináptica) y la información se transfiere a través de estructuras especializadas. La parte de la célula que envía la información tiene en la parte final del axón una terminal sináptica o presinapsis, mientras que la parte que recibe la información tiene una porción postsináptica (dendrítica). (Brailowsky, 1995, Pasantes, 1997, Tovar Franco, 2001).

Existen dos tipos de sinapsis: químicas y eléctricas¹². En los mamíferos, la mayoría de las sinapsis del SNC son de tipo químico. Este tipo de sinapsis consta de un elemento *presináptico* (que generalmente presenta la forma de botón axónico y contiene mitocondrias que suministran energía para la función sináptica, así como un conjunto de vesículas que encierran el neurotransmisor¹³ que será liberado a la hendidura sináptica), un elemento *postsináptico* (la membrana postsináptica) y el espacio entre ambos llamado hendidura sináptica. La sinapsis química es unidireccional (transmite información sólo en el sentido que va de la célula presináptica a la postsináptica). Solamente la célula presináptica libera el neurotransmisor y solo en la célula postsináptica se expresa la

¹² La sinapsis eléctrica es una sinapsis extraordinariamente rápida y es bidireccional. Permite el paso de corrientes eléctricas en forma de un flujo de iones a través de canales que conectan las dos células. Las células están unidas por la unión en hendidura (conocida en inglés como "*gap junction*") y los poros que las conectan son denominados conexones (IQB, 2010, b).

¹³ Los neurotransmisores son moléculas que pasan los impulsos nerviosos de una neurona a la siguiente (Dubuc, 2002).

proteína receptora que provocará la respuesta postsináptica normal a dicho neurotransmisor (Hutchins, Naftel y Ard, en Haines, 2003).

Algunas neuronas tiene cientos o hasta miles de dendritas que pueden a su vez ramificarse para permitir a la célula recibir información de otras células (Stangor, 2010, p.64).

El sistema nervioso opera con procesos electroquímicos. Cuando las dendritas de una neurona reciben una señal, esta se transmite al soma en forma de señal eléctrica, y si la señal es lo suficientemente fuerte, pasa a través del axón hasta los botones terminales, que liberan elementos químicos (llamados neurotransmisores) para comunicarse con otras células a través del espacio entre ellas (Stangor, 2010, p.64).

La señal eléctrica se mueve a través de la neurona como resultado en los cambios en las cargas eléctricas del axón. Normalmente el axón permanece en un estado en el que hay un mayor número de iones con carga negativa en comparación con el exterior de la célula (conocido como potencial de descanso) y cuando la parte más cercana al soma es estimulada por la señal eléctrica proveniente de las dendritas, la membrana celular de este primer segmento se abre y permite la entrada de los iones de sodio cargados positivamente que se encontraban fuera de la célula. El número de iones positivos excede entonces al de los negativos y este segmento adquiere una carga positiva de manera temporal. Al cambio de carga eléctrica que ocurre en una neurona cuando un impulso eléctrico es transmitido se le conoce como potencial de acción. La señal eléctrica se mueve por el axón de segmento en segmento, y conforme cada uno de ellos va adquiriendo una carga positiva, la membrana celular del segmento anterior se cierra nuevamente y ese segmento recupera su carga negativa (Stangor, 2010, p.64-65).

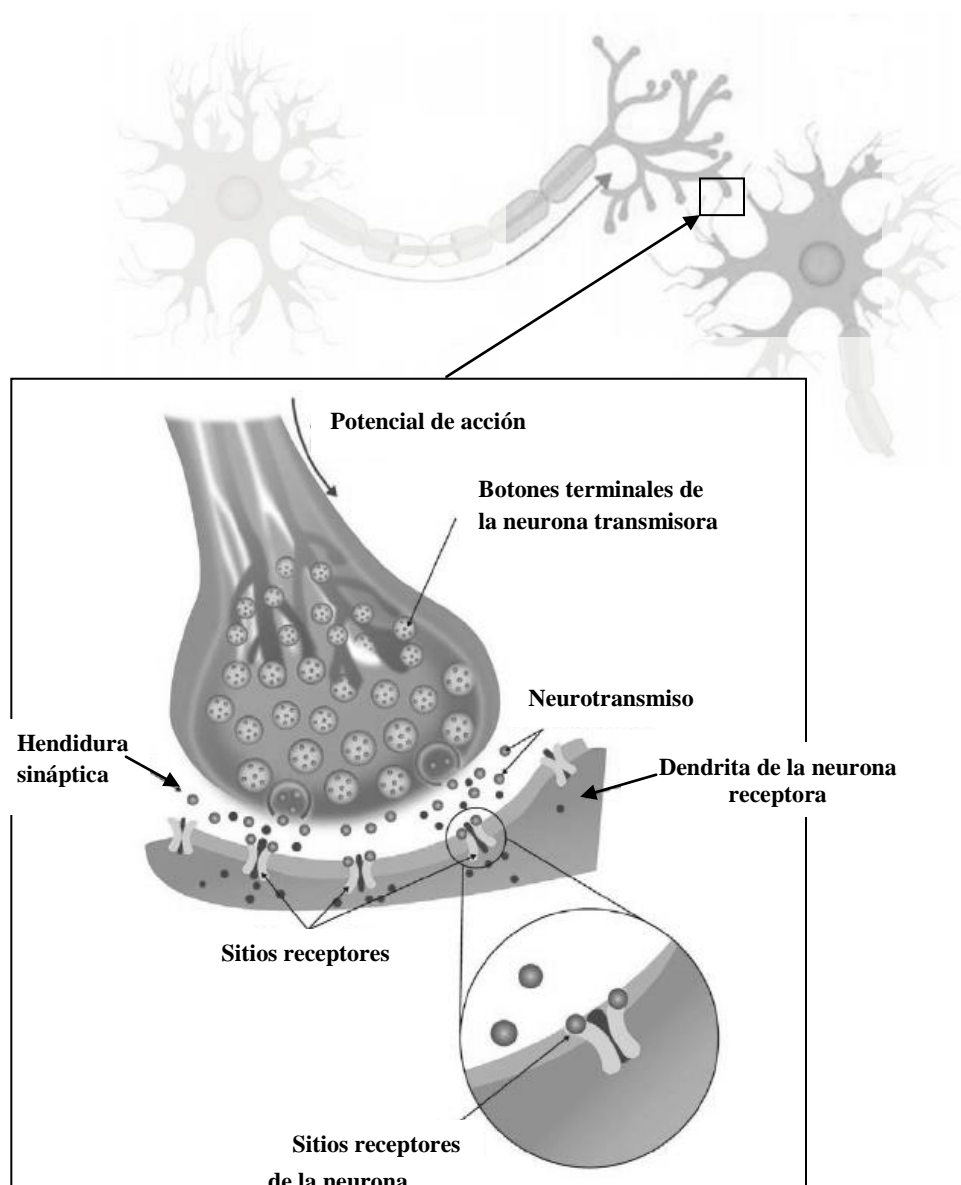


Figura 6.- Componentes de la neurona

Imagen tomada de *Introduction to psychology*, (Stangor, 2010, p.63 y 66).

Pasantes (1997) explica que las neuronas se comunican a través de cambios en las cargas eléctricas que llevan iones como el sodio y el potasio (carga eléctrica positiva) y el cloro (carga eléctrica negativa). La diferencia en la distribución de las cargas eléctricas es resultado de las diferencias en la concentración de potasio en el interior de la célula y sodio y el cloro en el exterior. La neurona se comunica con muchas otras neuronas al mismo tiempo, lo que hace que tenga una carga más negativa o más positiva que en el

estado de reposo, ya que cambia la permeabilidad de la membrana de la célula por acción de los neurotransmisores.

“...Si la neurona tiene una carga más positiva se genera una onda de información eléctrica, el potencial de acción... la cual se propaga muy rápidamente en el interior de la célula, en todas direcciones y también a través del axón. Si el potencial de acción al final del axón llega a una sinapsis eléctrica, la corriente pasa directamente a la siguiente neurona, pero si se trata de una sinapsis química lo que sucede es que el cambio en la carga eléctrica abre unos poros por los cuales entra a la célula el ion calcio, muy importante para el funcionamiento del sistema nervioso... Cuando aumenta la concentración de calcio en la terminación presináptica, la neurona lanza al exterior el neurotransmisor, que constituirá un puente químico entre las dos neuronas” (Pasantes, 1997, I).

A la rápida difusión del mensajero químico a través del espacio sináptico le sigue su unión a receptores insertados en la membrana postsináptica. El resultado es una modificación de las propiedades eléctricas, bioquímicas o genéticas de esa neurona (Rockhold, en Haines, 2003). En ocasiones, el receptor es el propio canal a través del cual entran los iones, que normalmente está cerrado pero que se abre al entrar en contacto con el transmisor. Otras veces se desencadenan complejas reacciones químicas que abren muchos canales iónicos¹⁴ (Pasantes, 1997).

La neurona está polarizada, tiene una diferencia de voltaje o potencial eléctrico (aproximadamente -70 milésimas de voltio) en ambos lados de la membrana neuronal. El polo negativo corresponde al interior de la neurona y el polo positivo al exterior. En el interior de la célula existen 40 veces más iones de potasio que en el exterior, y la membrana neuronal es muy permeable a este ion, lo que genera el potencial de reposo.

¹⁴ En un principio se creía que cada neurotransmisor se comunicaba con un solo tipo de molécula receptora, pero se ha ido descubriendo que existen familias de receptores que a pesar de las diferencias en sus estructuras interactúan con el mismo neurotransmisor (Pasantes, 1997).

Además, hay altas concentraciones de sodio (Na^+) y cloro (Cl^-) en el medio extracelular aunque la membrana es mucho menos permeable a estos iones que al potasio (K^+). Estas diferencias de concentración se mantienen a través de sistemas enzimáticos asociados a sustancias productoras de energía que transportan las partículas con carga eléctrica (Brailowsky, 1995).

Los cambios en las propiedades bioeléctricas o bioquímicas que el intercambio de información entre neuronas produce, implican un gasto de energía muy elevado (Hutchins, Naftel y Ard, en Haines, 2003). El cerebro requiere continuamente de gran cantidad de sangre y oxígeno (aproximadamente el 20% del flujo sanguíneo del corazón). Una pérdida de flujo sanguíneo, la falta de oxígeno o los niveles bajos de azúcar (glucosa) en la sangre pueden dañar seriamente al cerebro (Porter, 2003).

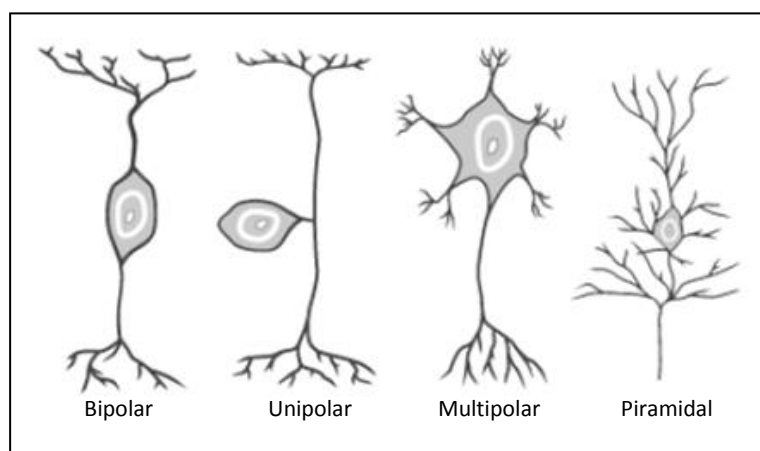


Figura 7. Algunos tipos de neuronas.
Imagen tomada de Baztarrica Ochoa, 2002, p.57

1.2.2 Áreas y funciones cerebrales

El pensamiento tiene lugar en la corteza cerebral¹⁵ y en ella residen las funciones intelectuales que nos hacen individuos. Es una densa formación de neuronas y constituye la superficie de cada hemisferio cerebral. La corteza cerebral se divide en regiones funcionales¹⁶, que elaboran la información sensitiva que reciben, organizan la actividad motora o realizan las funciones intelectuales superiores entre las que se encuentran la memoria, el entendimiento, la planificación de actividades complejas, el procesamiento del lenguaje, los cálculos matemáticos y la construcción de una imagen interna del medio (Lynch en Haines, 2003, p.506).

Habitualmente el hemisferio izquierdo controla el movimiento del lado derecho del cuerpo, mientras que el hemisferio derecho controla el del lado izquierdo. Existe evidencia de que cada hemisferio tiene funciones diferentes, pero por lo general ambos hemisferios trabajan juntos para desempeñar las tareas mentales (MRC, 2009).

Al hemisferio que controla el lenguaje se le llama *hemisferio dominante*. La mayoría de las personas procesan las funciones lingüísticas en el hemisferio izquierdo. Para casi todos los que son diestros y aproximadamente la mitad de los zurdos, el hemisferio dominante es el izquierdo, por lo que para la población general, el hemisferio derecho es el hemisferio no dominante (Lynch en Haines, 2003, p.516).

¹⁵ La corteza cerebral tiene un grosor de entre 2 y 4 mm y su área total aproximada es de 2,500 cm² (Lynch en Haines, 2003, p.506).

¹⁶ La corteza cerebral se divide en cuatro categorías funcionales generales: corteza sensitiva, motora, asociativa unimodal y asociativa multimodal. (Lynch en Haines, 2003, p.506).

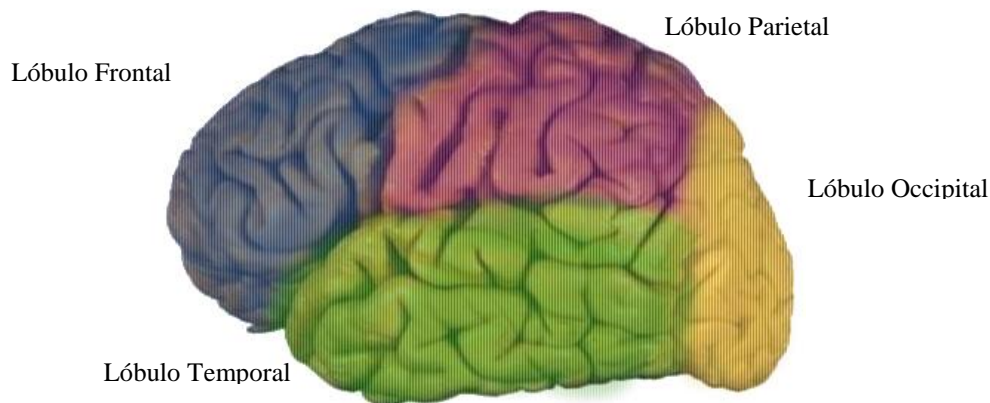


Figura 8.- Lóbulos frontal, parietal, temporal y occipital del hemisferio cerebral izquierdo del encéfalo. Imagen modificada de Nolte, Angevine, 2009, p.8.

Los lóbulos frontal, parietal, temporal y occipital son las divisiones externas de cada hemisferio. En ellos se encuentran áreas sensitivas específicas. Los lóbulos frontales ocupan una tercera parte de la corteza cerebral y su función no ha sido definida por completo (Gómez Beldarrain).

Los lóbulos frontales inician muchos de los movimientos voluntarios, controlan las habilidades motoras aprendidas (como tocar un instrumento musical), los procesos cognitivos complejos (pensamiento, concentración, solución de problemas, planificación, memoria y juicio) además de coordinar las expresiones faciales y los gestos de manos y brazos con los estados de ánimo y los sentimientos. El lóbulo frontal izquierdo controla las funciones involucradas en el uso del lenguaje (Porter, 2003, Stangor, 2010, p.74). Los lóbulos frontales están integrados por tres regiones: orbital, medial y dorsolateral¹⁷ que a su vez se dividen en diversas áreas (Flores, Ostrosky-Solís, 2008, p.48).

¹⁷ La región dorsolateral se divide en cuatro áreas principales: corteza motora (controla y ejecuta los movimientos del cuerpo al enviar señales al cerebelo y la espina dorsal), corteza premotora (permite la planeación, organización y ejecución secuencial de movimientos y acciones complejas), dorsolateral y anterior (Flores, Ostrosky-Solís, 2008, p.48, Stangor, 2010, p.74).

Los lóbulos temporales ocupan el 20 % de la corteza cerebral y entre los procesos cognitivos que controlan, está la atención selectiva, que es el proceso por el cual un subconjunto de estímulos recibidos es seleccionado de manera preferencial para ser procesado (Behrmann, Geng, Shomstein, 2004, p.1). Tienen la función de generar la memoria y las emociones, procesar los acontecimientos inmediatos en memoria reciente y de largo plazo, almacenar y recuperar memorias de largo plazo, comprender sonidos e imágenes para reconocer personas y objetos, e integrar la audición y el habla (Porter, 2003). El lóbulo temporal derecho se relaciona principalmente con la memoria visual, es decir, con imágenes y rostros, mientras que el lóbulo temporal izquierdo se involucra con la memoria verbal: palabras y nombres (TBI Law).

Los lóbulos parietales interpretan la información sensorial proveniente del cuerpo, controlan los movimientos corporales y combinan las impresiones de forma, textura y peso en percepciones generales. Tienen influencia (al igual que las áreas adyacentes de los lóbulos temporales) en las habilidades matemáticas y la comprensión del lenguaje. Almacenan memorias espaciales que permiten al sujeto la orientación en el espacio (saber dónde está) y el sentido de dirección (a dónde se dirige) y procesa la información que ayuda a saber la posición de las partes del cuerpo (Porter, 2003).

Los lóbulos occipitales procesan e interpretan la visión, permiten formar memorias visuales e integran las percepciones visuales con la información espacial que proveen los lóbulos parietales (Porter, 2003).

1.3 Neuroimagen

Existen dos tipos de tecnología para obtener imágenes del cerebro: tecnologías invasivas (los sensores se implantan directamente en el cerebro) y tecnologías no invasivas (que registran la actividad cerebral con sensores externos). Los métodos invasivos proporcionan imágenes de alta resolución temporal¹⁸ y espacial¹⁹, pero sólo abarcan regiones muy

¹⁸ “Resolución temporal: es el lapso mínimo comprendido entre la toma de dos imágenes de una misma zona, esto es, la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes del mismo punto...” (INE, 2007).

¹⁹ “Resolución espacial: es la distancia mínima entre dos objetos, de tal manera que el sensor los pueda separar como objetos distintos (tamaño de celda). Se refiere al objeto más pequeño que puede distinguirse como unidad independiente y es representada por el tamaño de un pixel (celda)” (INE, 2007).

pequeñas del cerebro y se limitan a la región en que fueron implantados los sensores (Tan y Nijholt, s.f.)

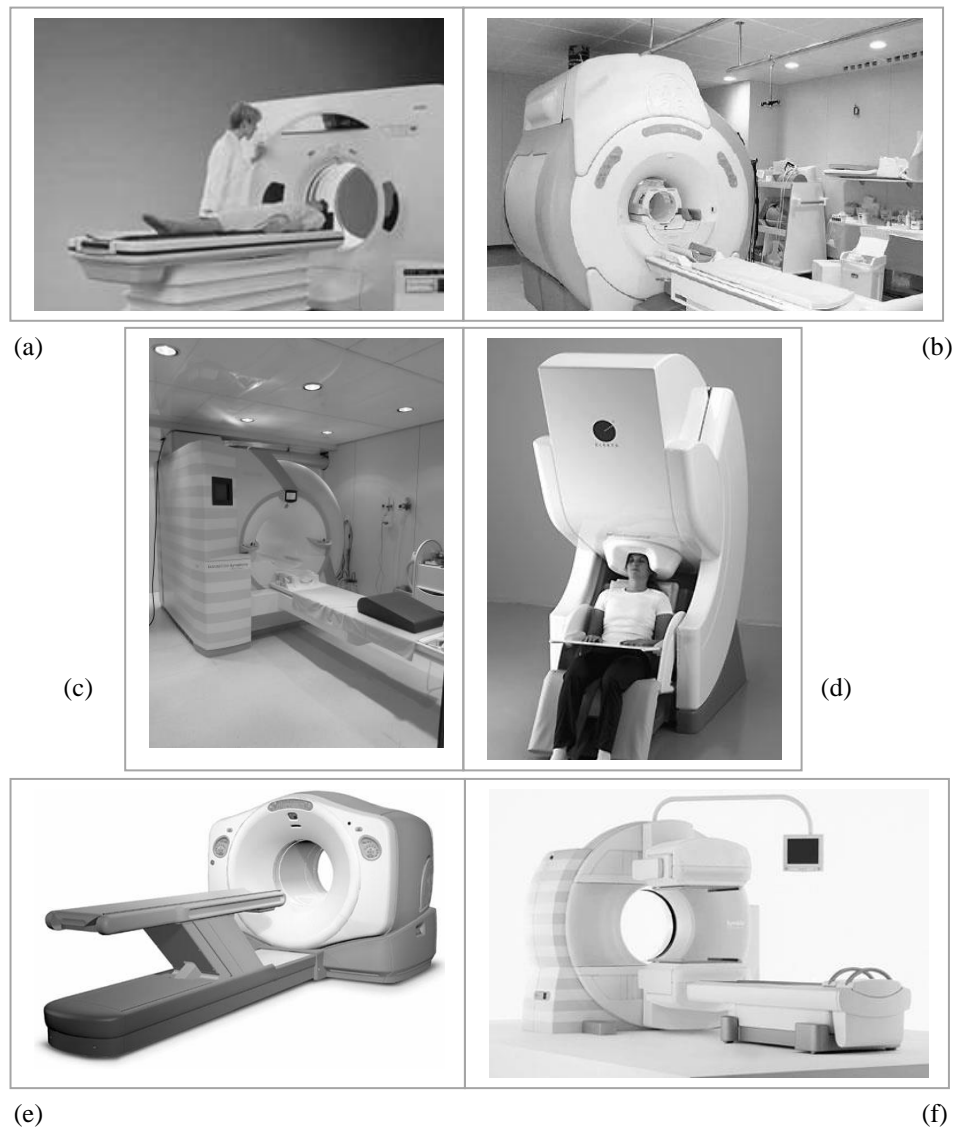


Figura 9. Equipos utilizados para la obtención de imágenes del cerebro.

- (a) Tomografía axial computarizada. Imagen tomada de: <http://wkheartandlung.com/Pulmonary.aspx>
- (b) Resonancia magnética. Imagen tomada de: Román Lapuente, Sánchez López, Rabadán Pardo, (s.f.), p.10
- (c) Resonancia magnética funcional. Imagen tomada de: <http://evocog.org/>
- (d) Magnetoencefalografía. Imagen tomada de: <http://evocog.org/>
- (e) Tomografía por emisión de positrones. Imagen tomada de: Medical City : <http://www.medicalcityhospital.com/CustomPage.asp?guidCustomContentID={580F5088-A0C5-463C-845B-9112E8E91462}>
- (f) Tomografía por Emisión de Fotón único. Imagen tomada de: http://www.biomedicalblog.com/wp-content/uploads/2010/07/symbia_sys1.jpg

1.3.1 Neuroimagen estructural²⁰

La neuroimagenología estructural busca la obtención de imágenes anatómicas de las estructuras craneo-encefálicas(Pulido Rivas, 1995). Estas técnicas son conocidas también como imagenología cerebral o “escaneo cerebral” (Gluck, Mercado y Myers, 2009, p.51).

1.3.1.1 Tomografía axial computarizada²¹ o TAC (CAT por sus siglas en inglés de *Computed Axial Tomography*)

“La tomografía computarizada...es la reconstrucción por medio de un computador de un plano topográfico de un objeto a partir de la medición de múltiples transmisiones de Rayos X” (Pulido Rivas, 1995, p.13).

Es un aparato que puede girar de 180° a 360° y que emplea rayos X (y un conjunto de detectores) para obtener múltiples imágenes detalladas de cortes axiales del cuerpo desde diferentes ángulos. Estas imágenes se integran en una computadora, que construye imágenes de cortes transversales (similares a rebanadas). La computadora asigna valores numéricos a las diferentes densidades captadas por los detectores dependiendo de la radiación absorbida por los tejidos (huesos, hemoglobina y estructuras calcificadas aparecen como zonas claras, mientras que la grasa o el líquido cefalorraquídeo aparecen como zonas oscuras).

Esta técnica ha disminuido su utilización ya que además del efecto nocivo de los rayos X, otras técnicas la superan en la obtención de detalle y contraste en tejidos blandos (Román Lapuente, Sánchez López, Rabadán Pardo, (s.f.); Gluck, Mercado, Myers, 2009).

²⁰ Las técnicas para la creación de imágenes de las estructuras anatómicas dentro del cerebro se conocen como neuroimagenología estructural, imagenología cerebral o “escaneo cerebral”. (Gluck, Mercado y Myers, 2009, p.51).

²¹ Allan Cormack y Godfrey Hounsfield obtuvieron por ella el premio Nobel en 1979. La TC fue la primera técnica de neuroimagen disponible (Román Lapuente, Sánchez López, Rabadán Pardo, (s.f.),p.2).

1.3.1.2. Resonancia magnética²² o RM (MRI por las siglas en inglés de *Magnetic Resonance Imaging*)

Permite visualizar imágenes nítidas en los tres planos (axial, sagital y coronal) y obtener reconstrucciones tridimensionales (Pulido Rivas, 1995, p.14). Es un proceso menos dañino para el paciente, ya que no utiliza Rayos X, sino la propiedad natural de algunas sustancias (como el agua) que tienen polos positivos y negativos y que cuando son sometidas a un campo magnético, tienden a alinearse en la dirección del campo.

El paciente se coloca acostado dentro de un imán de gran potencia que tiene forma de tubo y los cambios en los campos magnéticos son utilizados para generar imágenes de las estructuras internas del cuerpo del paciente. Esta técnica se basa en que ciertos núcleos atómicos (el núcleo del hidrógeno²³ o protón) se comportan como nano imanes. Se aplica un campo magnético y los protones se alinean en el sentido del campo. Una vez alineados se someten a una radiofrecuencia que perturba los núcleos y generan pequeñas corrientes eléctricas que los hacen rotar hacia la dirección del campo especificado por la señal de radiofrecuencia. Si la señal cesa, los núcleos vuelven a alinearse con el campo magnético y al hacerlo producen una señal que es detectada e interpretada a través de herramientas matemáticas para reconstruir la imagen (García Barreno, 2001; Gluck, Mercado, Myers, 2009).

1.3.2 Neuroimagen funcional

Las imágenes funcionales pueden ser de dos tipos: las que muestran la actividad metabólica y las que se generan de la actividad eléctrica cerebral (Pulido Rivas, 1995, p.14).

El registro de la actividad del cerebro en tiempo real ha generado diversas técnicas funcionales que utilizan el electromagnetismo como fuente de señal para generar la imagen. La distinción entre ellas depende del origen de la fuente. Esta puede ser externa al cerebro (Resonancia magnética funcional o fMRI y Resonancia magnética o RM) o

²² Se pueden obtener imágenes con gran detalle y contraste en los tejidos blandos; es sensible al movimiento de los líquidos y permite realizar análisis bioquímicos en vivo. (Román Lapuente, Sánchez López, Rabadán Pardo, (s.f.), p.11).

²³ Como el hidrógeno es un componente de las moléculas del agua, esta técnica puede mostrar su distribución en cualquier parte del cuerpo (García Barreno, 2001).

interna, es decir, generada por el cerebro (Electroencefalografía o EEG y Magnetoencefalografía o MEG). Las de fuente externa (fMRI, RM) exponen al sujeto a campos magnéticos muy intensos cuyos efectos secundarios no están del todo definidos. Las de fuente interna son inocuas (ya que sólo registran las emisiones del cerebro) y tienen la ventaja de medir la actividad neuronal directamente (Maestú, Gómez-Utrero, Piñeiro, Sola, 1999)

1.3.2.1. Resonancia magnética funcional (fMRI por las siglas en inglés de *functional Magnetic Resonance Imaging*)

Es una de las técnicas más utilizadas, a pesar de su alto costo. Su propósito es localizar anatómicamente un proceso funcional. Obtiene imágenes de la actividad del cerebro mientras éste realiza una tarea ya que mide los cambios en la distribución de sangre oxigenada durante la realización de la tarea y después de concluirla (Monge, 19 mayo, 2010).

Los procesos mentales producen aumentos en la actividad neuronal y éstos generan un incremento local de flujo sanguíneo. La hemoglobina tiene propiedades magnéticas: cuando la molécula está unida al oxígeno manifiesta una débil repulsión ante un campo magnético, pero cuando no está unida al oxígeno es atraída al campo magnético (Sell, 2007, p.661 y 662). Las imágenes obtenidas con esta técnica tienen excelente resolución espacial y puede obtener medidas de las partes más internas del cerebro (Monge, 19 mayo, 2010).

1.3.2.2. Tomografía por emisión de positrones²⁴ (PET por las siglas en inglés de *Positron Emission Tomography*)

No evalúa la morfología de los tejidos, sino que registra su actividad metabólica en tiempo real a través de imágenes en planos axiales. Detecta y analiza la distribución en el cuerpo de un material radiactivo (radioisótopo²⁵) administrado vía intravenosa, como puede ser el Flúor-18 que se une a la glucosa y permite localizar y

²⁴ “Mide la producción de fotones gamma (resultado de la destrucción de un positrón).” (Román Lapuente, Sánchez López, Rabadán Pardo, (s.f.), p.24).

²⁵ “Isótopo radiactivo de un elemento, como el hierro, el fósforo, el yodo, etcétera. Su importancia en medicina radica en la posibilidad de marcar ciertas sustancias y seguir sus pasos por el interior de un organismo.” (<http://salud.doctissimo.es/diccionario-medico/radioisotopo.html>).

cuantificar el consumo de glucosa cerebral regional (Román Lapuente, Sánchez López, Rabadán Pardo, (s.f.), p.24 y 26; MedlinePlus, 2010; Pulido Rivas, 1995, p.20).

1.3.2.3. Tomografía por Emisión de Fotón único (SPECT por las siglas en inglés de *Single Photon Emission Computerized Tomography*)

Similar a la PET, es menos costosa pero tiene menor resolución (Pulido Rivas, 1995). Permite obtener información funcional y metabólica al administrar un radioisótopo (vía intravenosa o inhalatoria) que emite radiación gamma y que se registra mediante una gran cámara rotatoria, por lo que es posible obtener imágenes coronales, sagitales, transversales y oblicuas. La información que se obtenga dependerá del radioisótopo utilizado²⁶ (Román Lapuente, Sánchez López, Rabadán Pardo, (s.f.), p.27-28).

1.3.2.4. Magnetoencefalografía (MEG por las siglas en inglés de *Magnetoencephalography*)

No requiere de la inyección de isótopos ni de exposición a rayos X o a campos magnéticos, ya que mide los campos magnéticos generados de manera natural por la actividad neuronal del cerebro (Marantz, Harker Rhodes IV, 2006). El cerebro genera campos magnéticos débiles que atraviesan el tejido del cerebro y del cráneo, y pueden registrarse de manera externa con detectores hipersensibles muy sofisticados, llamados SQUIDS (*Superconducting Quantum Interference Device*) que permiten una muy alta resolución temporal (Evocov, s.f.).

²⁶ “Los más utilizados son el Xenón 133 (^{133}Xe , administrado por vía inhalatoria o intravenosa) y el Tecnecio 99 ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)” (Román Lapuente, Sánchez López, Rabadán Pardo, (s.f.), p.28).

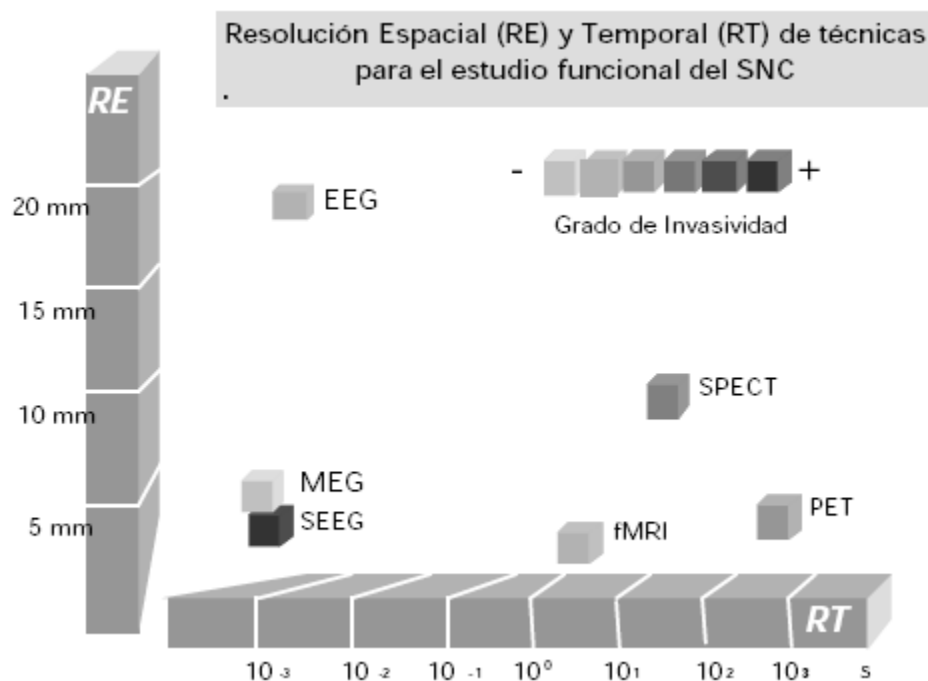


Figura 10.- Comparación de las técnicas de estudio funcional cerebral en función de su resolución temporal, espacial y grado de invasividad. Imagen tomada de Maestú, Gómez-Utrero, Piñeiro, Sola, 1999, p.1086

1.3.2.5. Electroencefalografía (EEG)

La actividad del cerebro produce impulsos eléctricos que son generados por las células nerviosas (neuronas) al procesar y almacenar información (Porter, 2003).

“Las neuronas al activarse producen flujos locales de corriente. El electroencefalograma mide principalmente las corrientes que fluyen durante las excitaciones sinápticas de las dendritas de muchas neuronas piramidales en la corteza cerebral... Las corrientes eléctricas del cerebro consisten primordialmente de iones de Na^+ , de K^+ , de Ca^{++} , y del Cl^- que son bombeados a través de canales en las membranas de la neurona...”

(Atwood, MacKay, 1989 en Teplan, 2002, p.1)

Stangor (2010) define la electroencefalografía como una técnica que registra la actividad eléctrica producida por las neuronas del cerebro por medio de electrodos colocados en el cuero cabelludo de una persona. Başar (2004) la describe como la medición y registro de la actividad eléctrica (o de los campos magnéticos) del cerebro proveniente de grandes grupos de neuronas, con electrodos colocados en el cuero

cabelludo o en el interior del cráneo; y considera esta técnica como un acercamiento fundamental al entendimiento de las funciones integradoras del cerebro.

Corral-Fernández (2007, p.2) la define como la exploración neurofisiológica basada en el registro de actividad bioeléctrica cerebral, en la que la señal del electroencefalograma (EEG) es :

"generada básicamente por la suma de actividad eléctrica de distintas poblaciones neuronales, las cuales pueden generar potenciales eléctricos y magnéticos que pueden ser registrados a cierta distancia de sus fuentes de producción (a nivel de la superficie de la corteza cerebral mediante electrodos en el cuero cabelludo- EEG de superficie)"

La definición que presenta Teplan (2002) incorpora los principales elementos mencionados:

“La electroencefalografía es una técnica médica de proyección de imagen que lee la actividad eléctrica del cuero cabelludo generada por las estructuras del cerebro. Se define el electroencefalograma (EEG) como actividad eléctrica de un tipo de alternancia registrada de la superficie del cuero cabelludo después de ser recolectada por electrodos de metal y medios conductores” (Niedermeyer, Lopes da Silva, 1993 en Teplan, 2002, p.1)

Los electrodos miden diminutas cargas eléctricas combinadas, producto de la actividad de grandes cantidades de neuronas (Gluck, Mercado y Myers, 2009). El patrón de activación varía según la actividad que realiza el cerebro, pero ante la dificultad de detectar una alteración eléctrica particular, se presenta el mismo estímulo de manera repetida y se promedian los electroencefalogramas (EEG) producidos²⁷. Los EEG promediados son conocidos como *potenciales relacionados con el evento* o PRE (también se les conoce como ERP por las siglas en inglés de *event-related potential*) (Gluck, Mercado y Myers, 2009).

²⁷ Ante un estímulo se pueden activar otras neuronas en diferentes áreas del cerebro que pueden no estar ligadas al procesamiento de ese estímulo; la actividad de las áreas no relacionadas será inconstante y solamente aquellas áreas que sí están involucradas se activarán sistemáticamente (Gluck, Mercado y Myers , 2009, p.63)

Hasta hace poco, los datos de las electroencefalografías eran registrados de manera análoga en papel, pero la encefalografía digital²⁸ permite nuevas posibilidades para el análisis de datos. La actividad bioeléctrica del cerebro puede captarse en la base del cráneo, en el cerebro expuesto, en localizaciones profundas del cerebro o sobre el cuero cabelludo y se pueden utilizar diferentes tipos de electrodos. Cuando la actividad se registra en el cuero cabelludo o en la base del cráneo se le llama electroencefalograma (EEG); si se realiza en el cerebro expuesto se le conoce como electrocorticograma (ECoG) y como estereo –electroencefalograma (E-EEG) si se realiza en localizaciones cerebrales profundas (Barea Navarro, 2011, p.9).

Existe varios tipos de electrodos para encefalogramas, pero éstos pueden ordenarse en cuatro grupos (Wang, 2009; Teplan, 2002): Discos reutilizables (planos o de copa), diademas o cascos de malla, adheribles con o sin gel (desechables) y de aguja (subcutáneos).

Barea Navarro (2011, p.9) expone otra clasificación de los electrodos, basada en el lugar en que éstos se colocan:

- superficiales (los que se sitúan sobre el cuero cabelludo),
- basales (se fijan en la base del cráneo y no requieren de un procedimiento quirúrgico) y
- quirúrgicos (corticales o intracerebrales y requieren de cirugía para instalarse)

Los electrodos se colocan en el cuero cabelludo en posiciones específicas.

Los esfuerzos de H.H. Jasper por encontrar un método para sistematizar la ubicación de los electrodos dio como resultado el Sistema 10-20 que se convirtió en el sistema estándar para la electroencefalografía clínica. En 1985 se aumentó el número de electrodos de este sistema, de 21 electrodos hasta 74. A esta extensión se le conoce como Sistema 10-10 que permite acomodar 64 canales en 74 sitios²⁹ (Jasper, 1958 en Oostenveld, Praamstra, 2001, p.713).

²⁸ Los electrodos leen la señal (en microvoltios) y amplificadores llevan fielmente la señal a un rango en que puede ser digitalizada; un convertidor cambia la señal de análoga a digital y la computadora guarda y despliega la información obtenida (Teplan, 2002, p.5). Para el lector interesado en profundizar en las características técnicas de la encefalografías (análogo y digital) se recomienda la lectura de Blum (1997).

²⁹ Actualmente, los investigadores utilizan sistemas con 128 canales y hasta sistemas con 256 canales (Oostenveld, Praamstra, 2001).

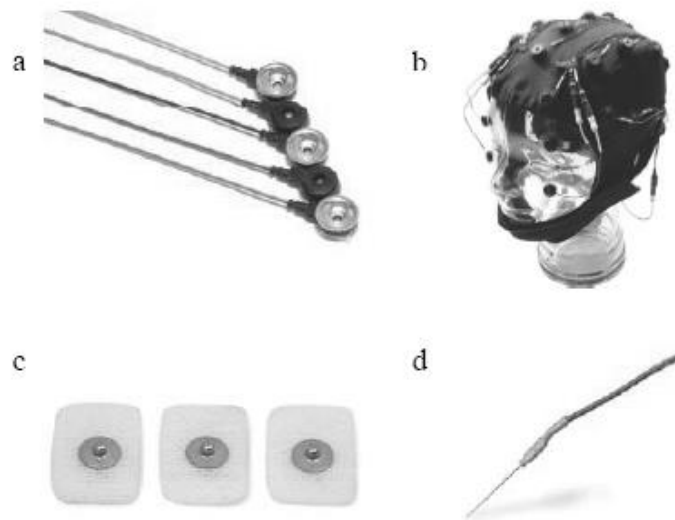


Figura 11.- Cuatro tipos de electrodos para EEG. a) De disco reutilizables, b) Casco de malla con electrodos de disco , c) adheribles con gel desechables, d) de aguja subcutáneo
Imagen tomada de Wang, 2009, p.13.

1.3.2.5.1. Sistema Estándar Internacional 10-20

En este sistema, el 10-20 representa porcentajes de las distancias que hay entre puntos extremos del cráneo (frente-nuca y lados derecho e izquierdo). Estas distancias del 10% y del 20% ayudan a determinar la posición de los electrodos, tomando como base dos puntos: nasion³⁰ o punto nasal (que se encuentra entre la frente y la base de la nariz) e inion³¹ (que es la protuberancia en la en la parte media posterior de la cabeza) (Neurology investigations, 19 de agosto, 2008).

La distribución se obtiene de la siguiente manera: Los puntos principales que se utilizan como referencia para obtener las demás posiciones³² son: frontal (Fz), central (Cz), parietal (Pz) y occipital (Oz). La letra A representa la oreja. La letra z del subíndice indica que son puntos sobre la línea central (nasion-inion), los números como subíndice son para distinguir a qué hemisferio corresponde el punto: si es número par se trata de un punto en el hemisferio derecho, mientras

³⁰ Nasion o punto nasal, que es el “punto situado en la raíz de la nariz en el centro de la sutura nasofrontal ” (Portalesmedicos.com, 2010).

³¹ Inion: “Protuberancia occipital externa” (Portalesmedicos.com, 2010).

³² El Sistema Internacional 10-20 es muy utilizado en la electroencefalografía y la ubicación de los electrodos o sensores responde a un formato estándar que identifica el lóbulo en el cerebro (Frontal, Temporal, Central, Parietal y Occipital), el hemisferio (derecho o izquierdo) y la cercanía con la línea media o eje del cráneo. 10-20 hace referencia a la distancia de 10% y 20% entre los sensores (Martínez Vera, 2009).

que los números nones se utilizan para los puntos del hemisferio izquierdo (entre menor sea el valor del número en el subíndice, más cerca estará el punto de la línea central).

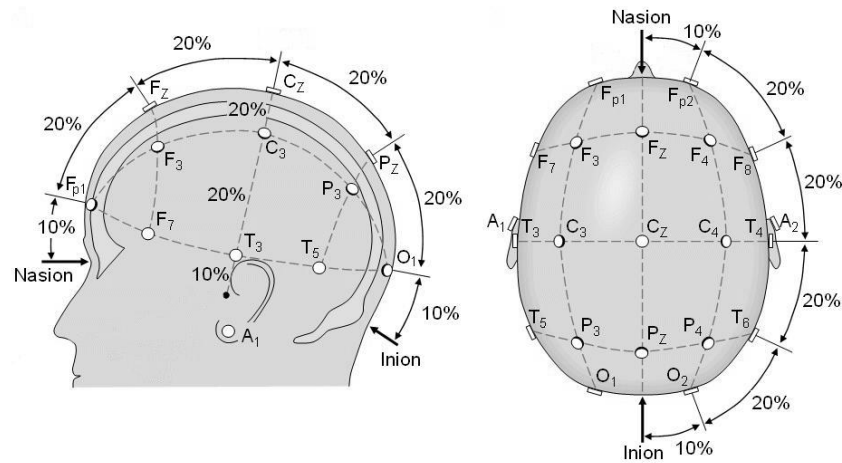


Figura 12.- Sistema Estándar Internacional 10-20.
Imagen tomada y modificada de Malmivuo, Plonsey, 1995, Capítulo 13.

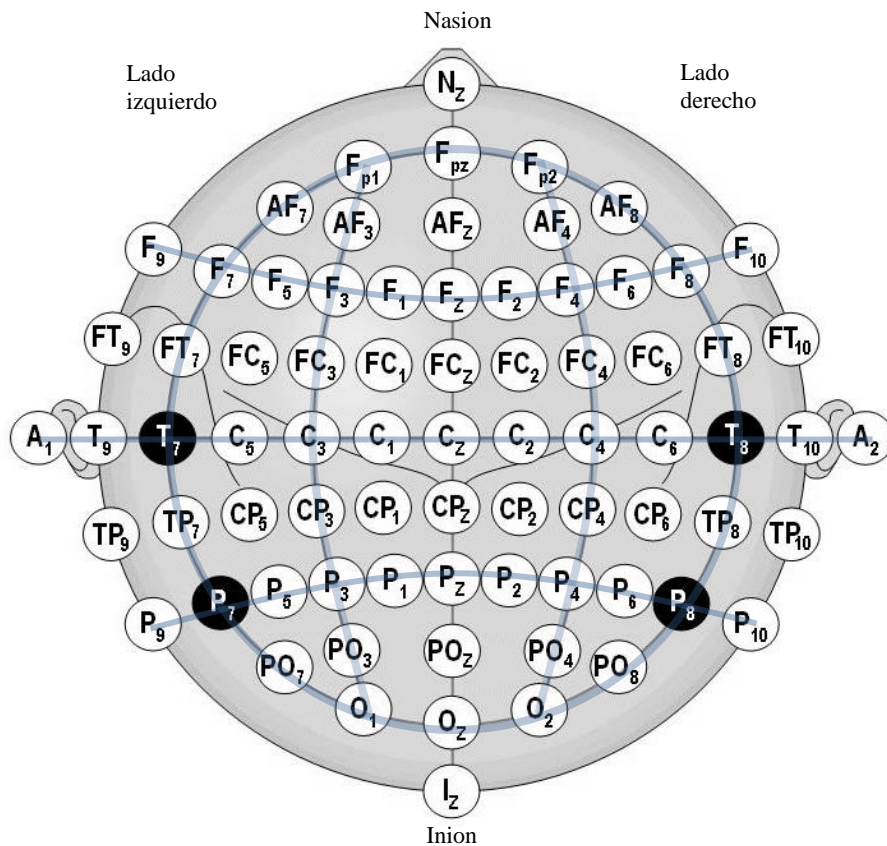


Figura 13.- Ubicación y nomenclatura de los electrodos intermedios a distancia del 10%.
Imagen tomada y modificada de Malmivuo, Plonsey, 1995, Capítulo 13.

1.3.2.5.2. Tipos de Oscilaciones EEG

Cada electrodo aporta una gran cantidad de información continua. La actividad eléctrica se registra en el encefalograma como ondas sinusoidales rítmicas continuas, que se clasifican en cinco tipos de ondas según su rango de frecuencia en hertzios (Hz). Ninguna de ellas se emite sola, sin embargo los estados de conciencia del sujeto pueden hacer que predomine uno de los rangos de frecuencia (Baztarrica Ochoa, 2002, p.13; Wang, 2009,p.33).

1.3.2.5.2.1. Oscilaciones Delta (δ)

Su rango de frecuencia es menor a los 4 Hz. (de 0.5 a 3.5 Hz) y se presentan en la parte frontal en los adultos y en la parte posterior en los bebés, cuando el individuo duerme profundamente, sin soñar; es la oscilación con mayor amplitud y con la frecuencia más lenta. Esta señal proviene de la parte profunda del cerebro, y tiende a atenuarse a su paso por el cráneo, pero puede confundirse con señales producidas por los músculos del cuello y la mandíbula que son más superficiales (Barea Navarro, 2011,p.22; Corrales Villanueva,2010,p.33; Baztarrica Ochoa, 2002, p.15) .

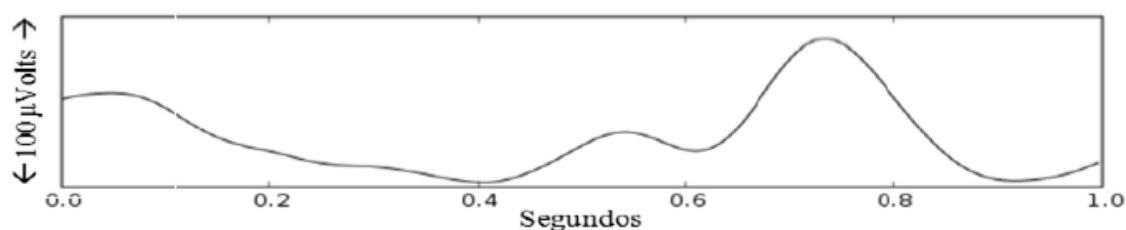


Figura 14.- Comportamiento de las ondas delta en un segundo
Imagen tomada de Corrales Villanueva, 2010, p.17.

1.3.2.5.2.2. Oscilaciones Teta (θ)

Su rango de frecuencia es de 4 - 8Hz (usualmente con una amplitud mayor de 20μ V). Se registra ante la tensión emocional, en especial ante la frustración y la decepción. Se le asocia también con la inspiración creativa, el acceso al material inconsciente y la meditación profunda (Baztarrica Ochoa, 2002, p.14). Puede producirse cuando el sujeto está hiperventilado y también cuando hay

estados de trance o hipnosis, ensoñación profunda (soñar despierto), sueño lúcido, sueño ligero y en el estado preconsciente que el individuo experimenta justo antes de despertarse o de quedarse dormido (Wang, 2009, p.14-15).

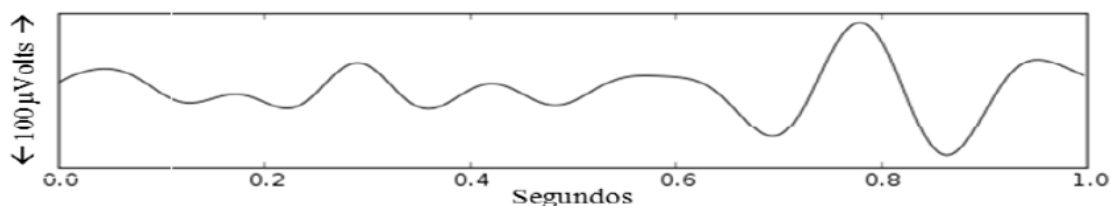


Figura 15.- Comportamiento de las ondas teta en un segundo.
Imagen tomada de Corrales Villanueva, 2010, p.17.

1.3.2.5.2.3. Oscilaciones Alfa (α)

Su rango de frecuencia es 8 - 12 Hz y su amplitud tiende a ser menor de 50 μV. Se presentan espontáneamente en los adultos en condiciones de relajamiento, inactividad mental y alerta; se detectan mejor en el área occipital (ambos lados del área posterior de la cabeza, con una amplitud mayor del lado dominante) y cuando el sujeto tiene los ojos cerrados. Una variante normal de las oscilaciones alfa es el ritmo Mu (μ), que se ve en ocasiones en la corteza motora (en la parte central del cuero cabelludo). Este ritmo se atenúa con imágenes mentales de movimiento o cuando el sujeto se mueve (Wang, 2009, p.15, Quian Quiroga, 1998, p.6).

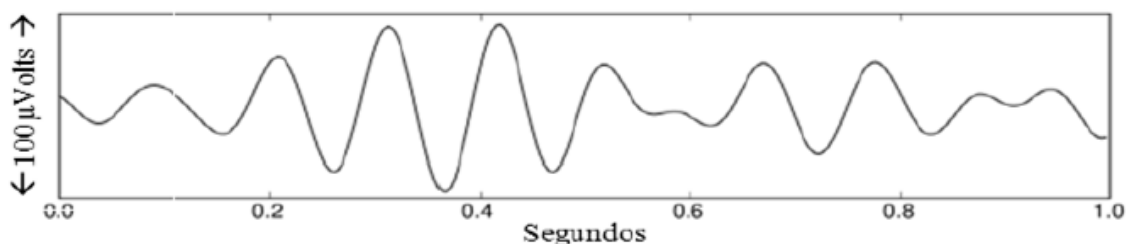


Figura 16.- Comportamiento de las ondas alfa en un segundo.
Imagen tomada de Corrales Villanueva, 2010, p.17.

1.3.2.5.2.4. Oscilaciones Beta (β)

Su rango de frecuencia es 13 - 30 Hz. Se observan en todas las edades. Tienden a ser de baja amplitud, pero simétricas. Algunas drogas como barbitúricos y benzodiacepinas incrementan estas ondas (Sucholeiki, Louis, 2010). Se registran en las regiones frontales, parietales y centrales cuando el sujeto está despierto en condiciones normales, en estado de alerta. Se les asocia con el pensamiento y la atención activos o el pensamiento ansioso, con el enfoque en el medio externo o con resolver problemas concretos (Barea Navarro, 2011, p.22; Sörnmo, Laguna, 2005; Baztarrica Ochoa, 2002; Martínez Vera, 2009, p.10).

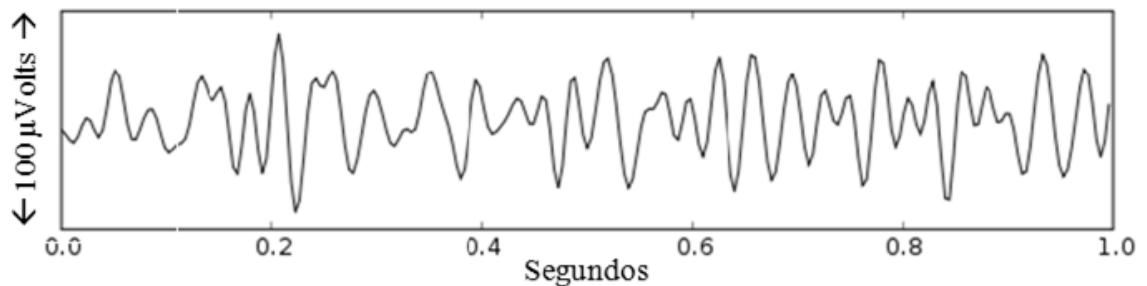


Figura 17. -Comportamiento de las ondas beta en un segundo.
Imagen tomada de Corrales Villanueva, 2010,p.18.

1.3.2.5.2.5. Oscilaciones Gama (γ)

Su rango de frecuencia es 30 – 60 Hz, aunque autores como Corrales Villanueva (2010) mencionan que su frecuencia está en un rango de 30 hasta 100 Hz y que se relacionan con la unión de diferentes poblaciones neuronales durante procesos sensoriales y motores precisos, así como funciones cognitivas complejas (Quián Quiroga, 1998, p.6; Ortiz Alonso, 2009, p.4).

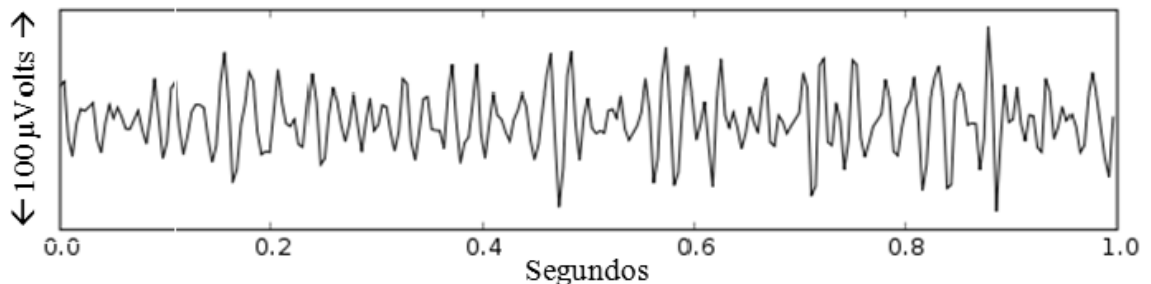


Figura 18.- Comportamiento de las ondas gamma en un segundo.
Imagen tomada de Corrales Villanueva, 2010, p.19.

Tabla 1.- Oscilaciones u ondas electroencefalográficas.

Tabla formada con la información de (Martínez Vera,2009; Sörnmo,2005;Baztarrica Ochoa,2002; Sucholeiki, s.f.)

<i>Ritmo</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Región</i>
Delta δ	< 4Hz	variable	Frontal en los adultos, Posterior en los niños.
Teta θ	4 - 8 Hz	> 20 μ V	Zona temporal
Alfa α	8 - 12 Hz	30-50 μ V	Zona Occipital y Frontal
Beta β	13 - 30 Hz	5-30 μ V	Zonas Frontal y Central
Gamma γ	> 30 Hz.		

1.3.2.2.5.3. Artefactos fisiológicos

Los artefactos son contaminaciones en el EEG; son actividad registrada que no se origina en el cerebro y que altera la información. Pueden ser de tipo fisiológico, como los movimientos oculares o musculares involuntarios del sujeto (parpadeo, corazón, movimientos corporales) o extra fisiológicos, es decir, que se generan fuera del cuerpo (en el ambiente o en el equipo) (Buitrago Bolívar et al., 2008, p.1-2; Wang, 2009, p. 15-16).

1.4 Conclusiones parciales

El capítulo presenta una visión general del cerebro humano, sus funciones y sus estructuras. De las regiones del cerebro, podemos sintetizar la siguiente información que nos será de utilidad en la realización de este proyecto:

La corteza cerebral se divide en áreas funcionales: motoras o intelectuales como la memoria, la planificación o la visualización. Ambos hemisferios desempeñan tareas mentales, y el hemisferio dominante (generalmente el izquierdo) controla el lenguaje. Algunos procesos, como la memoria, ocupan varias regiones del cerebro. Cada hemisferio se divide en regiones sensitivas específicas o lóbulos, de los cuales, los frontales ocupan la mayor área (una tercera parte). Los lóbulos procesan diferentes tipos de información.

Los lóbulos frontales controlan las expresiones faciales, los movimientos aprendidos y los procesos cognitivos complejos (razonamiento, planificación y memoria, entre otros). Los temporales generan las emociones y el procesamiento de la memoria de corto plazo así como el procesamiento y recuperación de la memoria de largo plazo que permite el

reconocimiento. Los lóbulos temporales se relacionan a la atención selectiva; lóbulo temporal derecho maneja la memoria visual y el izquierdo la memoria verbal. Y los occipitales forman memorias visuales y las integran con la información espacial de los lóbulos parietales.

Esta información nos apoya en la elección de la interfaz cerebro computadora. De los dispositivos comerciales disponibles, sólo uno ofrece la ubicación y el número de sensores necesarios para monitorear varias áreas del cerebro de manera simultánea. Este proyecto se centra en la medición de estados emocionales específicos (la frustración, el entusiasmo instantáneo y el entusiasmo de largo plazo), sin embargo la interfaz elegida ofrece amplias posibilidades de monitoreo y control de acciones ya que sus sensores abarcan los lóbulos frontales, parietales, temporales y occipitales.

El capítulo otorga particular atención a la sección de electroencefalografía, sobre otras técnicas de neuroimagen, ya que este proyecto la utiliza como técnica de registro de la actividad cerebral. Los avances tecnológicos (entre ellos la digitalización de la electroencefalografía) así como el estudio del cerebro y su actividad en tiempo real han abierto las posibilidades para utilizar este conocimiento en otros campos, como la ciencias de la computación, la mecatrónica, la psicología y el diseño.

En el electrocardiograma (EEG) digital (que representa un promedio de la actividad cerebral) se distinguen los ritmos u oscilaciones electroencefalográficas. Cada rango de frecuencias (y amplitudes) está asociado a regiones cerebrales, funciones y/o actividades cognitivas particulares. Los movimientos musculares generan actividad eléctrica que se registra en el electroencefalograma y que no debe ser confundida con actividad cognitiva.

CAPITULO II:
MEMORIA, ATENCIÓN, EMOCIÓN Y CARGA COGNITIVA

CAPITULO II: MEMORIA, ATENCIÓN, EMOCIÓN Y CARGA COGNITIVA

“...el aprendizaje y la memoria no son procesos puntuales que ocurren en un sitio cerebral determinado, sino que, son estados funcionales para los que se requiere la participación de numerosas estructuras nerviosas y la correcta activación temporal entre ellas. Por ello, el aprendizaje depende del estado motivacional y emocional del individuo que aprende, del grado de atención, de sus conocimientos y habilidades previas, de sus receptores sensoriales, así como del estado de sus músculos, en el caso de que se trate de aprendizaje motor” (Aguado-Aguilar, Espinoza Pardo, Oruro Puma, Carrión, 2010, p.3).

2.1 Introducción

Los estados emocionales y los procesos cognitivos involucrados en la solución de tareas simples y complejas nos incentivan a profundizar en la manera que el cerebro procesa la información antes de almacenarla y esto incluye la carga cognitiva que se presenta ante una tarea compleja, un diseño instruccional o ante la variedad de medios utilizados para desplegar la información al usuario.

En esta sección se examina el papel que juega la memoria en la codificación y recuperación de la información, en la influencia que la emoción tiene en estos procesos, y en la importancia de la atención en el almacenamiento de la información.

2.2 Memoria

La memoria es considerada un proceso psicológico para almacenar información codificada que puede ser recuperada, de forma voluntaria y consciente o de manera involuntaria. Stangor (2010, p.222) define la memoria como la habilidad de almacenar y recuperar información en un cierto periodo de tiempo y Díaz (2009, p.4) la considera como *“el conjunto de funciones mentales que permiten retener, reconocer y evocar información”*. Carrillo-Mora (2009) considera más apropiado nombrarla como *“Sistemas de Memoria”*, por ser un conjunto de funciones distintas, estrechamente relacionadas y no una función cerebral estática, aislada o única; es decir:

“...un grupo de funciones cerebrales que tienen la tarea de clasificar, codificar, almacenar y recuperar una gran diversidad de tipos de información que resultan de importancia para el organismo en particular” (Carrillo-Mora, 2009, p.86-87).

Su clasificación se ha ido modificando a través del tiempo, en función del conocimiento de la anatomía y la fisiología de la memoria. El estudio de la memoria está en constante actualización y el tema puede abordarse desde diferentes perspectivas o enfoques³³: molecular, celular, neuroquímico, anatómico, evolutivo, neuropsicológico, etc. (Carrillo-Mora, 2009, p.87). La memoria ha sido estudiada desde tiempos de Platón y Aristóteles pero hasta el siglo XIX los métodos empleados (lógica, introspección, comparación, reflexión, entre otros) eran más bien empíricos y filosóficos. Hermann Ebbinghaus (1885) realizó estudios experimentales relacionados con la repetición verbal y el rendimiento en la consecución de nuevas tareas (o curva de retención). Mientras que William James (1890) propuso la distinción entre memoria de corto y largo plazo. Más adelante Richard Semon (1921, 1923) distinguió tres procesos de memoria: codificación de la información (o engrafía), los cambios en el Sistema Nervioso que preservan los efectos de la experiencia (o engrama³⁴) y la recuperación de la información (o euforia) (Carrillo-Mora, 2009, p.87; Díaz, 2011, p.9).

Soriano Mas, Guillazo Blanch, Redolar Ripoll, Torras García y Vale Martínez (2007, p.335) describen las etapas de la memoria como:

- a) La codificación, en la que se procesa la información para almacenarse y que consta de dos fases: la adquisición (registra los estímulos entrantes en almacenes sensoriales) y la consolidación (que genera una representación más duradera).
- b) El almacenamiento en un registro permanente de la información que ha sido adquirida y consolidada.
- c) La recuperación de la información almacenada en una representación consciente o una acción aprendida.

³³ En este documento abarcaremos el tema de la memoria de manera general, ya que existen textos especializados cuyo objetivo está más allá de los propósitos de este trabajo.

³⁴ "la huella cerebral de un ítem particular de información almacenada con el aprendizaje y recuperada con el recuerdo" (Díaz, 2009, p.13)

Se atribuyen a Bekhterev (1899) las primeras asociaciones entre la memoria y las lesiones cerebrales del lóbulo temporal y a Donald Hebb (1949) la propuesta de sistemas transitorios de para almacenar la información, además de la idea de cambios estructurales en las neuronas en la memoria de largo plazo (Carrillo-Mora, 2009, p.88). Una larga serie de estudios y observaciones relacionados con la memoria, el aprendizaje y las habilidades verbales y visuales en pacientes con lesiones quirúrgicas o traumáticas en el lóbulo temporal (como las realizadas por Brenda Milner³⁵ en la década de los 50's) sentaron antecedentes importantes en el estudio de la memoria.

Larry Squire (1986) propuso la clasificación de la memoria en dos sistemas: declarativa y no declarativa (Ver Tabla 2) (Carrillo-Mora, 2009, p.89), que Soriano Mas, Guillazo Blanch, Redolar Ripoll, Torras García, Vale Martínez (2007, p.337), Kandel (2008), y Gluck, Mercado, Myers (2009) sintetizan de la siguiente manera:

La memoria declarativa (o explícita) se refiere al conocimiento de hechos o memorias semánticas (conocimiento general) y a los eventos o memorias episódicas (personas, lugares, cosas); la información se recupera de manera consciente; se forma rápidamente por la asociación de informaciones diferentes, pero puede olvidarse con rapidez. Esta memoria se vincula con el hipocampo y el lóbulo temporal medio.

La memoria no declarativa (o implícita) se refiere a habilidades motoras y perceptuales (cómo hacer algo: andar en bicicleta, manejar un máquina, etc.); se recuerda inconscientemente (cuando se reúnen las condiciones en las que fue adquirida) y no se olvida fácilmente. Se forma por la repetición y la práctica, y se vincula con la amígdala, el cerebelo y los reflejos.

³⁵ Una interesante descripción del trabajo de investigación de Brenda Milner puede verse en “The Aging Brain”, (Charlie Rose The brain series, episodio 6, Marzo 25, 2010), disponible en: <http://www.charlierose.com/view/interview/10929>

Tabla 2.- Clasificación de la memoria según Squire (1986): Memoria declarativa y no declarativa
Modificada de (Carrillo-Mora, 2009, p.89) con información adicional de Gluck, Mercado, Myers (2009, p.126-127); Soriano Mas, Guillazo Blanch, Redolar Ripoll, Torras García, Vale Martínez (2007, p.337).

Memoria	Subsistema
Declarativa o explícita	Se expresa en palabras y puede ser de: Eventos (o episódica): Memoria de un evento autobiográfico específica (personas, lugares, cosas). Está ligada al contexto espacial y temporal. Puede debilitarse ante la repetición de eventos similares. Hechos (o Semántica): conocimiento de hechos (conocimiento general). Ligada a un contexto. Se fortalece con la repetición.
No declarativa o implícita	Se expresa en conductas. No asociativas: habituación y sensibilización Procedimental: (de hábitos y habilidades) memorias de habilidades cognitivas, perceptuales-motoras y condicionamientos. Son patrones aprendidos de movimientos guiados por los estímulos sensoriales. Memorias duraderas que mejoran con la repetición. Su recuperación es inconsciente. Priming ³⁶ .

Endel Tulving (1985) propone un modelo de memoria similar, con tres sistemas que trabajan conjuntamente que él denominó niveles de conciencia: adquisición, representación y la expresión del conocimiento. Posteriormente Tulving y Daniel Schacter (1990) definen un modelo de cinco sistemas que dependen de los mecanismos cerebrales, el tipo de información (Carrillo-Mora, 2009, p.89) (Ver Tabla 3).

Existen otros sistemas dicotómicos de memoria³⁷ adicionales al de la memoria declarativa y la no declarativa; y diversos enfoques en el estudio y la clasificación de la memoria.

Según su temporalidad³⁸ (la duración del trazo de memoria) las más utilizadas son la memoria a corto plazo y la memoria de largo plazo propuestas por James y Ebbinghaus (Díaz, 2011, p.11, Alcaraz Romero y Gumá Díaz, 2001, p.201).

³⁶ *Priming* se refiere al incremento en la sensibilidad a un estímulo debido a una experiencia previa, sin conocimiento consciente de esa percepción anterior.

http://psychology.about.com/od/pindex/g/def_priming.htm

³⁷ “...procesos de memoria consciente vs. inconsciente; memoria de corto vs. largo plazo; memoria implícita vs. explícita; memoria retrospectiva vs. prospectiva; recuerdo voluntario vs. involuntario; aprendizaje intencional vs. incidental...” (Carrillo-Mora, 2009, p.91).

³⁸ Entre las clasificaciones temporales se encuentran: la memoria primaria (de breve duración, ubicada en la conciencia y relacionada a aquello que se está atendiendo), la memoria secundaria (almacenamiento de información a largo plazo para recuperarla posteriormente) la memoria sensorial (fracciones de segundos), la memoria a corto plazo (de segundos hasta no más de un minuto) e incluye la memoria de trabajo, que mantiene la atención consciente sobre la información que se está procesando o utilizando y la memoria a largo plazo (más de un minuto). Las definiciones temporales y los modelos de procesamiento no son coincidentes (Alcaraz Romero y Gumá Díaz, 2001, p.201).

Según las habilidades u operaciones aprendidas, L. Squire y S. Zola-Morgan la organizan en: memoria declarativa (explícita, consciente e intencional) para acontecimientos (o episódica) y conceptos (o semántica); y memoria no declarativa (implícita, no consciente e incidental) para habilidades motoras, perceptuales y cognitivas o la formación de hábitos y procedimientos (Alcaraz Romero y Gumá Díaz, 2001, p.201-202).

Tabla 3.- Clasificación de los sistemas de memoria según Tulving y Schacter (1990)
Tomada de (Carrillo-Mora, 2009, p.90).

Sistema de memoria	Contenido
• Memoria procedimental	Hábitos y destrezas; condicionamiento simple
• Sistemas de representación perceptual	<i>Priming</i>
• Memoria de corto plazo	Información rápidamente disponible sobre eventos cognoscitivos recientes
• Memoria semántica	Conocimiento general del mundo
• Memoria episódica	Recolección consciente del pasado personal

Díaz (2009) enumera los cinco procesos que implican a la información memorable:

- *La fuente del estímulo o de la experiencia*³⁹.
- *La codificación*, en la que destaca la importancia de la atención, la emoción y la motivación en la adquisición y fijación de la información, así como el aprendizaje derivado de la experiencia⁴⁰.
- *El almacenaje* que se refiere a las modificaciones⁴¹ en las funciones del cerebro durante la consolidación de la información.

³⁹ Díaz (2009, p.4) distingue los estímulos de las experiencias. Considera los estímulos como señales electromagnéticas o electroquímicas, concretas y definibles por su intensidad y duración, que pueden ser recibidas o procesadas inconscientemente. Y se refiere a las experiencias como señales (representaciones de aquello que experimentamos, sentimos o conocimos de manera consciente) codificadas como eventos mentales.

⁴⁰ De la experiencia puede derivarse el aprendizaje individual, en el que el individuo ajusta su conducta a partir de la información adquirida por sí mismo. Se dice que es aprendizaje social cuando el ajuste de la conducta es resultado de la información adquirida al observar a otro (Díaz, 2009, p.10).

⁴¹ Los cambios se dan de múltiples maneras en todos los niveles (molecular (compuestos químicos), celular (nuevas conexiones entre neuronas y fortalecimiento de sinapsis), intercelular(cambios en los conjuntos de conexiones y redes neuronales), modular (variaciones en talla, composición química o textura fina de núcleos y módulos), orgánico (modificaciones en el tamaño y configuración del cerebro por la experiencia) y orgánico (cambios en las pautas de comportamiento)). (Díaz, 2009, p.14-19).

- *La recuperación* de la información o contenido inconsciente y su transformación a un recuerdo consciente. Consta de dos procesos: el reconocimiento⁴² y la rememoración⁴³ (que incluye la reminiscencia, es decir, un recuerdo evocado por un estímulo).
- *La eliminación* de la información (olvido), que se da al no poder recordar algo; cuando la información no es transferida de la memoria de corto a la de largo plazo. Puede involucrar la interferencia en donde los recuerdos compiten en sus atributos y contextos (Díaz, 2009, p.21-24).

2.2.1 La memoria desde la perspectiva de la Psicología

Colom y Flores-Mendoza (2001) mencionan que en la psicología existen al menos tres grandes perspectivas de la memoria (Smith, 1996 en Colom, Flores-Mendoza 2001, p.38) cuyas teorías se distinguen entre sí por los elementos en los que basan su estudio:

a) *Etapas de la memoria*, en las que se distingue la codificación (o percepción de la información), el almacenamiento (o el mantenimiento de la información) y la recuperación (o el recuerdo de lo almacenado).

b) *Sistemas de la memoria*, que separa la memoria en Memoria sensorial (impresiones sensoriales del entorno con una duración que no suele ser mayor a medio segundo), Memoria de corto plazo (donde el sujeto maneja conscientemente las impresiones sensoriales que pueden ser desplazadas por nueva información y que tienden a sufrir de limitaciones temporales) y Memoria de largo plazo (o memoria permanente, donde llega y se almacena la información procesada en la memoria de corto plazo para su posterior recuperación. La información puede ser de tipo episódica, semántica, procedimental, etc.).

⁴² El reconocimiento es el “*recuerdo sensorial o perceptivo ante estímulos que ya fueron procesados o experimentados; de manera automática y sumamente rápida mediante procesos de identificación y categorización específicos del tipo de procesamiento perceptual*” (Díaz, 2009, p.21).

⁴³ La rememoración es “*búsqueda activa en los almacenes de la memoria de tal manera que se recupera algo vivido o aprendido sin necesidad de estímulos actuales*” (Díaz, 2009, p.21).

c) *Recursos cognitivos de la memoria*, en donde se destacan los procesos cognitivos en relación a factores como la velocidad de procesamiento de información o la habilidad para inhibir la información irrelevante.

Nuestro proyecto de investigación se interesa en las aplicaciones multimedia educativas, y favorece las teorías de los sistemas de memoria y las teorías de los recursos cognitivos de la memoria, por estar ambas perspectivas ligadas al aprendizaje multimedia y a la teoría cognoscitiva del aprendizaje multimedia de Mayer (2005). De entre las grandes perspectivas de estudio de la memoria, consideramos conveniente para nuestro proyecto el acercamiento de Byrnes (2001), ya que éste aborda el tema desde el punto de vista de los sistemas de la memoria y describe los elementos más importantes que la conforman, para después sustentar éste enfoque con evidencias proporcionadas por el campo de la neurología.

Entre los componentes de la memoria, Byrnes (2001) describe los búferes sensoriales (*sensory buffers* o almacenadores sensoriales), los sistemas de ensayo (*rehearsal systems*), los registros, las indicaciones o señales (*cues*), la memoria de trabajo y la memoria permanente.

Los búferes sensoriales corresponden a los diferentes almacenadores temporales de información sensorial (proveniente de los detectores sensoriales localizados en ojos, oídos, nariz, lengua, piel y de los sistemas perceptuales que les corresponden ubicados en el cerebro). Retienen la información el tiempo suficiente para que esta sea interpretada (Byrnes, 2001, p.48).

Los sistemas de ensayo permiten visualizar o repetir continuamente una información (por ejemplo un número telefónico o la lista de tareas pendientes); estos sistemas pueden ser:

- de ensayo de información verbal (conocido como el bucle fonológico o *phonological loop*), que mantiene información oral durante uno o dos segundos antes que se desvanezca y que pueden renovarse si se articulan nuevamente o se evocan a través de un mecanismo de repetición subvocalico; o
- de ensayo de información visual y espacial (también llamada agenda visoespacial o *visuospatial sketch pad*) que se encarga de mantener y manipular

imágenes visoespaciales e información verbal codificada de manera icónica ya que cuenta con un mecanismo de repaso para prolongar la huella de las imágenes mentales. Ambos son susceptibles a las interferencias y su capacidad es limitada (Byrnes, 2001, p.48; Góngora Costa, 2009, p.20; Manso, Ballesteros, 2003, p.388).

Los registros se refieren a la representación mental de un segmento de información almacenado de manera permanente en la memoria, y pueden retener cuatro clases de conocimiento (declarativo, instrumental o procedimental, conceptual y episódico) en dos tipos de códigos o formatos: visual o verbal. Los registros tiene dos características: *fuerza* (que es el grado de recuperación de la información de la memoria al nivel de consciencia) y *nivel de activación* (o grado de disponibilidad) (Byrnes, 2001, p.50-53).

Las indicaciones (*cues*) se refieren a elementos en el entorno o piezas de los sistemas de ensayo que están relacionadas a los registros, y que pueden cambiar el nivel de activación; si el nivel es suficientemente elevado, el registro estará disponible a la consciencia (Byrnes, 2001, p.53).

En cuanto a la memoria de trabajo y memoria permanente, Baddeley y Hitch en 1974 definieron la memoria de trabajo (*working memory*) como un “*subsistema de la memoria a corto plazo, de capacidad limitada y de carácter transitorio, que permite un almacenamiento y procesamiento simultáneo de la información*” (Pascual Millán, s.f., p.1), Se habla de cinco procesos que se relacionan con la creación de registros permanentes, es decir, con almacenar información en la memoria permanente: atención, codificación, ensayo, elaboración y consolidación: y de tres maneras principales de recuperarla: recordar, el reconocimiento y la reconstrucción deductiva (cuando las indicaciones o *cues* generan la recuperación parcial de un registro más completo) (Byrnes, 2001, p.57).

2.3 Atención

Es posible encontrar diversas definiciones de la atención y la de William James (1890) es una de las primeras y la más citada en los libros del tema:

“Tomar posesión de la mente, en una forma vívida y clara de uno de muchos posibles objetos o formas de pensamiento presentados en forma simultánea. La focalización y la concentración de la conciencia son parte de su esencia. Implica hacer a un lado algunas cosas para poder manejar otras eficientemente” (González Garrido, Ramos Loyo, 2006, p.2).

Otras definiciones consideran a la atención como *“un sistema de capacidad limitada que realiza operaciones de selección cuya disponibilidad o estado de alerta fluctúa considerablemente”* (Ginarte Arias, 2007, p.3) o *“una actividad mental que describe múltiples fenómenos cognitivos”* (Levinoff et al., 2004 en Vimal, 2008, p.86);

El programa de Maestría en neuropsicología de la Universidad Autónoma de Barcelona sostiene que la atención *“implica percepción selectiva y dirigida, interés por una fuente particular de estimulación y esfuerzo o concentración sobre una tarea”* (UAB, 2001).

El desarrollo de teorías y modelos alrededor del procesamiento de la información han enriquecido la investigación de la Atención desde mediados del siglo XX⁴⁴.

La atención influye en la toma de decisiones, ya que se relaciona con la visión, la percepción, la emoción, la cognición, la memoria, la recompensa y la acción (las respuestas motoras pueden ser voluntarias o involuntarias) (Johnson, Proctor, 2004, p.13; Vimal, 2008, p.85).

Entre 1950 y 1974 la investigación en este tema recibió un enfoque cognitivo, centrado en el estudio del procesamiento de la información y el modelo de Kahneman (1973) adquirió popularidad; este modelo considera la atención como un único recurso que puede ser dividido (en cantidades desiguales) entre diferentes tareas. Posteriormente modelos como el de Navon y Gopher (1979) que consideran la atención como un recurso múltiple obtuvieron mayor aceptación. Wickens (1980) va más allá, al proponer la existencia de diferentes recursos de atención para distintos estímulos sensoriales, modos de codificación

⁴⁴ Para una consulta detallada de la historia de la investigación en el tema de la atención, se recomienda la lectura de Johnson y Proctor (2004).

y modalidades de respuesta. La teoría de la atención como recurso múltiple propone utilizar distintos modos de entrada-salida de los estímulos en la realización de tareas múltiples para lograr un mejor desempeño. Como ejemplo de esto, realizar una tarea verbal y otra visuoespacial tendrá mejores resultados que realizar ambas con un mismo tipo de estímulo (Johnson, Proctor, 2004, p.19-20).

De los diferentes enfoques con los que puede abordarse el estudio de la atención, la Psicología Cognitiva y la Neuropsicología Cognitiva han adquirido relevancia por las recientes aportaciones al campo. La contribución de la Psicología Cognitiva incluye múltiples modelos teóricos sobre los mecanismos de procesamiento. La Neuropsicología Cognitiva, que se apoya en el marco teórico y experimental de la Psicología Cognitiva, se interesa en conocer la operación de la cognición y las redes neurales que se activan en el procesamiento de la información (Ginarte Arias, 2007, p.2).

Entre las posibles mediciones del procesamiento de la información se encuentran el tiempo de respuesta y la exactitud; pero existen métodos de medición fisiológicos, como la electroencefalografía (que registra los procesos neurales que tienen lugar en un período de tiempo, aunque no ofrece información de qué procesos específicos está registrando) y las técnicas de neuroimagen que han beneficiado al conocimiento de los mecanismos del cerebro que se relacionan con la atención (Johnson, Proctor, 2004, p.51)

González Garrido y Ramos Loyo (2006, p.23-24) sintetizan las cualidades comunes a los modelos que basan su estudio en las características neurofisiológicas de la atención: todos exponen que la atención está compuesta de varios procesos, que los subprocessos dependen de grupos de neuronas localizados en distintas regiones del sistema nervioso y que las alteraciones funcionales de distintas regiones del cerebro generan trastornos específicos en la atención. Se cree en la existencia de un sistema neurofisiológico: el sistema atencional como parte fundamental del funcionamiento del sistema nervioso, que regula la entrada de la información seleccionando y organizando la percepción y que participa en el procesamiento de la información (Posner y Petersen, 1990 en Estévez-González, García-Sánchez y Junqué, 1997, p. 1989). La atención⁴⁵ involucra los dos hemisferios cerebrales, a los que se les relaciona con funciones especializadas; y cada hemisferio regula su propia

⁴⁵ "...la neuroanatomía y neurofisiología de la atención se asentaría en el sistema reticular activador, tálamo, sistema límbico, ganglios basales (estriado), córtex parietal posterior y córtex prefrontal" (Estévez-González, García-Sánchez y Junqué, 1997, p. 1989).

activación. Mientras que el control del hemisferio izquierdo es unilateral, el del hemisferio derecho es bilateral; es decir, el hemisferio del lado derecho puede activar al hemisferio izquierdo en mejor medida de lo que el izquierdo podría activar al derecho. De manera adicional, el hemisferio derecho regula la atención selectiva (Estévez-González, García-Sánchez y Junqué, 1997, p. 1990).

Estévez-González, García-Sánchez y Junqué (1997) describen la atención como una función que se regula a través de tres sistemas que interactúan entre sí:

- a) el sistema de alerta⁴⁶, también conocido como “*arousal*”
- b) el sistema de selectividad perceptiva (o atención posterior)
- c) y el sistema de atención anterior⁴⁷ o atención supervisora (reguladora de la atención deliberada); y reconocen diversos tipos de atención regulados por estos tres sistemas, entre los que se encuentran:

- 1.- Vigilancia, alerta o “*arousal*” que se refiere a la intensidad del grado de alerta.
 - 2.- “*Span*” atencional que se relaciona con la amplitud de la atención.
 - 3.- Atención selectiva o focal, o atención perceptiva regulada por el córtex parietal posterior.
 - 4.- Atención de desplazamiento, es decir, la atención necesaria para focalizar un área del campo visual, desenfocarla y enfocar otra área del campo visual.
 - 5.- Atención serial, relacionada con las tareas de búsqueda y cancelación de un estímulo repetido entre otros estímulos distractores.
 - 6.- Atención dividida, dual o compartida, que se requiere para poder realizar dos o más tareas paralelas.
 - 7.- Atención de preparación, para realizar operaciones cognitivas utilizando los esquemas y respuestas más convenientes.
 - 8.- Atención sostenida, que se refiere a la capacidad de concentración durante un largo periodo de tiempo.
 - 9.- Inhibición de las respuestas naturales o automáticas,
- (Estévez-González, García-Sánchez y Junqué, 1997, p.1992-1994).

⁴⁶ Suministra el tono atencional y depende del sistema reticular mesencefálico y de sus conexiones (Estévez-González, García-Sánchez y Junqué, 1997, p. 1989).

⁴⁷ Depende de las zonas del córtex parietal posterior derecho y sus conexiones (Estévez-González, García-Sánchez y Junqué, 1997, p. 1989)

Tabla 4.- Sistemas y tipos de atención según Posner y Petersen(1990),Cooley y Morris (1990),Posner y Driver (1992), Posner y Dehaene (1994),Pardo et al (1991) y Corbetta et al (1990,1991,1993) en Estévez-González, García-Sánchez y Junqué, (1997).
Modificada de (Estévez-González, García-Sánchez y Junqué, 1997, p.1993).

	Sistema de alerta (<i>arousal</i>)	Sistema de atención posterior	Sistema de atención anterior
Funciones	Nivel base de consciencia, como estado generalizado de receptividad a la estimulación y a la preparación de respuestas	Atención de orientación a estímulos visuales. (Explorando el espacio visual)	Atención para la acción: recluta y controla las áreas cerebrales para ejecutar las tareas cognitivas complejas.
Denominaciones Sinónimas	Consciencia Atención matriz de Mesulam Atención tónica o primaria Tono de atención	Sistema de atención selectiva posterior Sistema atencional visuoespacial Sistema de atención perceptiva	Sistema de atención selectiva anterior Sistema atencional supervisor de Norman y Shallice Sistema atencional frontal Atención ejecutiva Atención ligada a la acción Atención motora
Localización neuroanatómica	Sistema reticular activador Tálamo Sistema límbico Ganglios basales Córtex frontal	Córtex parietal posterior (control de cambio de atención o “shifting attention”) Pulvinar lateral (Filtrar información relevante) Colículo superior (facilitar el “shifting” de atención visual y la orientación del organismo hacia los objetos de interés)	Cingulado anterior (subsistema atencional medio) Prefrontal dorsolateral Neostriado (caudado) Orbitofrontal Sistema frontal superior (subsistema para el control de los movimientos oculares y ligado íntimamente al sistema atencional posterior)
Tipos de atención		“Shifting attention” Atención selectiva especial o de localización de estímulos Atención serial	Atención dividida o dual o compartida Atención de preparación Inhibición Atención sostenida Atención selectiva a propiedades del objeto

2.4 Emoción

Stangor (2010, p.290) define la emoción como el sentimiento de estado mental y fisiológico que dirige la atención y guía el comportamiento. La emoción se compone de respuestas fisiológicas (como incrementos en la transpiración o cambios en el ritmo cardíaco), conductas observables (expresiones faciales, postura o tono vocal) y sentimientos conscientes (experiencias subjetivas como la tristeza o la felicidad) que están interrelacionados (Gluck, Mercado y Myers, 2009, p.382).

La emoción influye en la manera en que las memorias se almacenan y se recuerdan. Las emociones cotidianas fortalecen las memorias y las emociones extremas incrementan la fuerza y la duración de las memorias. (Gluck, Mercado y Myers, 2009, p.390).

Emociones como felicidad, tristeza, enojo, temor, repugnancia y sorpresa son consideradas como emociones universales porque se experimentan y se reconocen en todas las culturas (Ekman y Friesen, 1984 en Gluck, Mercado y Myers, 2009, p.383). Las interpretaciones cognitivas que acompañan a las emociones nos permiten experimentar un grupo más amplio y complejo de emociones secundarias más complejas (Stangor, 2010,292).

Existen varias teorías de la emoción, como la teoría de James-Lange, que sustenta que “*los estados corporales provocan sentimientos conscientes*” (Gluck, Mercado y Myers, 2009, p.385), es decir, los estímulos sensoriales generan un procesamiento sensorial en la corteza sensorial y esta envía información a la corteza motora, lo que desencadena la expresión o respuesta física. El sentimiento (la sensación consciente de la emoción) se da de manera posterior cuando el córtex recibe la información de los cambios ocurridos en el estado fisiológico. La teoría de Cannon-Bard propone que la respuesta física y la sensación consciente o sentimiento se dan al mismo tiempo (Soriano Mas, Guillazo Blanch, Redolar Ripoll, Torras García, Vale Martínez, 2007, p.293-295).

El circuito de Papez plantea que la información del estímulo emocional que llega al tálamo se divide en dos: una ruta para el pensamiento⁴⁸ y una ruta para el sentimiento⁴⁹. MacLean (1949 en Soriano Mas, Guillazo Blanch, Redolar Ripoll, Torras García, Vale Martínez, 2007, p.297) amplió la teoría de Papez al proponer una mayor participación del sistema límbico en la expresión de las emociones.

La visión actual de la emoción sustenta que “*la experiencia de la emoción o sentimiento es una creación del cerebro para explicar las reacciones del cuerpo ante una determinada situación*” (Soriano Mas, Guillazo Blanch, Redolar Ripoll, Torras García, Vale Martínez, 2007, p.299). Se considera que las emociones dependen de la interacción constante de tres elementos: las respuestas corporales, los sentimientos conscientes y las valoraciones cognitivas del contexto (Gluck, Mercado y Myers, 2009, p.386).

⁴⁸ que lleva la información a la neocorteza (Soriano Mas, Guillazo Blanch, Redolar Ripoll, Torras García, Vale Martínez, 2007, p.296)

⁴⁹ en la que la información va a “los cuerpos mamilares del hipotálamo y se ponen en marcha mecanismos neuroendocrinos, autonómicos y motores de la expresión emocional” (Soriano Mas, Guillazo Blanch, Redolar Ripoll, Torras García, Vale Martínez, 2007, p.296)

Cada emoción activa regiones diferentes del cerebro, aunque no hay una región que se active con todas las emociones. Las emociones influyen en la codificación y recuperación de las memorias. (Gluck, Mercado y Myers, 2009, p.389 y 399).

2.5 Carga cognitiva

La información que se recibe del entorno, debe procesarse en la memoria de trabajo antes de ser almacenada en la memoria de largo plazo. Como la memoria de trabajo tiene una capacidad limitada, la información a procesar puede exceder esta capacidad, dejando sin procesar algunos de los elementos de información.

2.5.1 Carga cognitiva y carga mental

Sweller (en Mayer, 2005, p.28) define carga cognitiva como la carga que se impone a la memoria de trabajo durante el procesamiento de la información. La teoría de la carga cognitiva (Pass, Renkl y Sweller, 2003, 2004, Sweller, 1999,2003; Sweller, Van Merriënboer y Pass, 1998) se fundamenta en una arquitectura cognitiva de una memoria de trabajo limitada y unidades de procesamiento de información visual-espacial y auditiva-verbal parcialmente independientes que interactúan con la memoria de largo plazo. La carga cognitiva es un factor importante en el aprendizaje y en la realización de tareas cognitivas complejas ya que el desempeño decrece si existe sobrecarga, pero también si la carga es muy poca (infracarga) (Pass, Tuovinen, Tabbers, van Gerven, 2003, p.64)

Se distinguen tres tipos de carga cognitiva (Merriënboer y Sweller en Mayer, 2005, p.161):

- *carga intrínseca*, que se deriva de la interacción entre la complejidad de la información que debe ser procesada y el grado de habilidad del estudiante,
- *carga externa o superflua*, causada por diseños instruccionales inapropiados,
- *carga relacionada*, que es efecto de la variedad de materiales utilizados para representar la información y ayudar a lograr la construcción de esquemas.

Las decisiones instruccionales que tomen los diseñadores y los desarrolladores pueden influir en la carga externa y en la carga relacionada, sin embargo los tres tipos de carga cognitiva se suman e influyen en la carga cognitiva total que se asocia a un diseño instruccional.

La carga cognitiva tiene varios atributos, como la *carga mental*, el *esfuerzo mental* y el *desempeño*. La carga mental es el resultado de la interacción entre las características de la tarea y el sujeto (Pass, Tuovinen, Tabbers, van Gerven, 2003, p.64).

González Gutiérrez, Moreno Jiménez y Garrosa Hernández (2005, p.20) describen la carga mental “*como un atributo propio de la interacción entre el operador y la tarea o las tareas que realiza*” y la definen como “*el costo cognitivo en el que se incurre al tratar de afrontar las demandas cognitivas de las/s misma/s*”.

Pass y van Merriënboer (1994) sostienen que la *carga mental* proporciona una indicación de las demandas de la capacidad cognitiva previstas, puede considerarse como una estimación a priori de la carga cognitiva y puede ser determinada por nuestro conocimiento actual acerca de la tarea y del sujeto.

El *esfuerzo mental* se refiere a la capacidad cognitiva asignada para responder a las demandas impuestas por una tarea, por lo que puede considerarse como un reflejo de la carga cognitiva. El *desempeño* se define en función de los logros del aprendiz (número de aciertos, número de errores y tiempo requerido en la tarea). La intensidad del esfuerzo de un estudiante frente a una tarea es esencial para obtener un estimado de la carga cognitiva, ya que aporta información que no siempre se refleja en las mediciones de carga mental o de desempeño (Pass, Tuovinen, Tabbers y van Gerven, 2005, p.65).

2.5.2 Medición de la carga cognitiva

El estudio de la carga cognitiva no es nuevo; sin embargo los avances tecnológicos ofrecen nuevas herramientas para su medición. Existen diversas clasificaciones de las técnicas para medir la carga cognitiva, sin embargo, tradicionalmente se reconocen tres tipos de medición:

- a) mediciones de desempeño (porcentaje de aciertos o errores, o tiempo requerido para completar la tarea)
- b) mediciones con escalas de valoración (valoraciones subjetivas que se toman durante o al terminar una tarea)
- c) mediciones fisiológicas (se toman al momento que se realiza la tarea y se analizan de manera objetiva, sin influir en el desempeño del individuo) (Ikehara, Crosby, 2005).

Esta investigación se enfoca en las mediciones fisiológicas, por la objetividad que aporta a la recolección de datos. Este tipo de medidas son resultado de los cambios que experimenta el individuo a nivel del sistema nervioso autónomo (SNA) y del sistema nervioso central (SNC).

Entre las mediciones fisiológicas, las siguientes han sido asociados a la carga mental (Ikehara, Crosby, 2005, p2; González Gutiérrez, Moreno Jiménez y Garrosa Hernández, 2005, p.134-143):

La *tasa cardiaca* tiene una baja capacidad para diagnóstico pero una alta sensibilidad a la dificultad que enfrenta el sujeto en una tarea; se asocia con el estrés, la emoción y la intensidad.

El *diámetro pupilar*, cuyo aumento se asocia a un incremento en el nivel de demanda de recursos que genera realizar actividades como las operaciones aritméticas y resolución de problemas, las tareas de control y memoria a corto plazo. Es de alta sensibilidad (y limitado diagnóstico). Las mediciones cognitivas que se asocian a estos cambios son fatiga, dificultad, emociones fuertes, interés, actividad mental, actitudes positivas y negativas, velocidad de procesamiento de información entre otras.

La *tasa de parpadeo* y la *fijación visual* de la pupila se asocian a la atención selectiva y son importantes cuando existen varias fuentes de información visual, ya que permiten detectar la fuente específica de atención. Son útiles para las tareas visuales, pero pierden valor en la realización de las tareas auditivas. Los incrementos en la *temperatura* (entorno, dedos, muñeca, tímpano) se asocian con el estrés, la emoción y la intensidad.

La actividad respiratoria (*tasa respiratoria*) incrementa con la demanda de atención, pero por sí sola no ofrece resultados consistentes y fiables, sin embargo un aumento en la medición de la cantidad de aire respirado por minuto se relaciona con la carga mental.

La variación en los niveles hormonales también se asocia con el estrés.

De entre este tipo de medidas, destaca la medición de la *actividad cerebral espontánea*, que involucra las técnicas de neuroimagen y la electroencefalografía (EEG) y que es el punto principal de esta investigación.

Estas técnicas de medición tienen como ventaja que proveen información continua, pero también tiene algunas desventajas, como la variación en los cambios que puede ser muy pequeña (diámetro de la pupila o la temperatura corporal), lo que requiere aparatos de medición sofisticados capaces de detectarlos.

2.5.3 Características neurológicas de la sobrecarga cognitiva

La electroencefalografía (EEG) ha dado paso a otra técnica, la resonancia magnética funcional (fMRI) que con mucho mayor resolución permite analizar a detalle e identificar las regiones del cerebro que intervienen en la atención, la memoria de trabajo y la carga cognitiva (Whelan, 2006, p.4).

Whelan (2006) analiza una década de investigaciones y experimentos con resonancia magnética funcional y propone que esta técnica de neuroimagen permite observar las propiedades de ciertas funciones cerebrales relacionadas a los diferentes tipos de carga cognitiva⁵⁰. Una exposición detallada del análisis funcional de los experimentos e investigaciones analizadas por Whelan excede los objetivos de este trabajo; sin embargo la Figura 19 muestra las regiones implicadas en la carga cognitiva⁵¹.

⁵⁰ Estudios de neuroimagen sobre la memoria de trabajo (Newman, Just y Carpenter, 2002, “*The synchronization of the human cortical working memory network*”), el equipo de investigación de Banich, Milham, Atchley, Cohen, Webb y Wszalek (2002, “*Prefrontal regions play a predominant role in imposing an attentional ‘set’*”) con experimentos en variaciones en la dificultad de la carga intrínseca, los estudios de procesamiento con múltiples modalidades (que se relacionan con la carga extrínseca) realizados por Just, Carpenter, Keller, Emery, Zajac, Thulborn (2001, “*Interependence of nonoverlapping cortical systems in dual cognitive tasks*”) son sólo algunos ejemplos de estas investigaciones (Whelan, 2006).

⁵¹ La carga intrínseca se relacionan con la corteza dorsolateral prefrontal (DLPFC), la corteza parietal y el área de Wernicke se asocian a la carga externa, mientras que la carga relacionada se asocia con el frontal superior y el sulcus intraparietal.

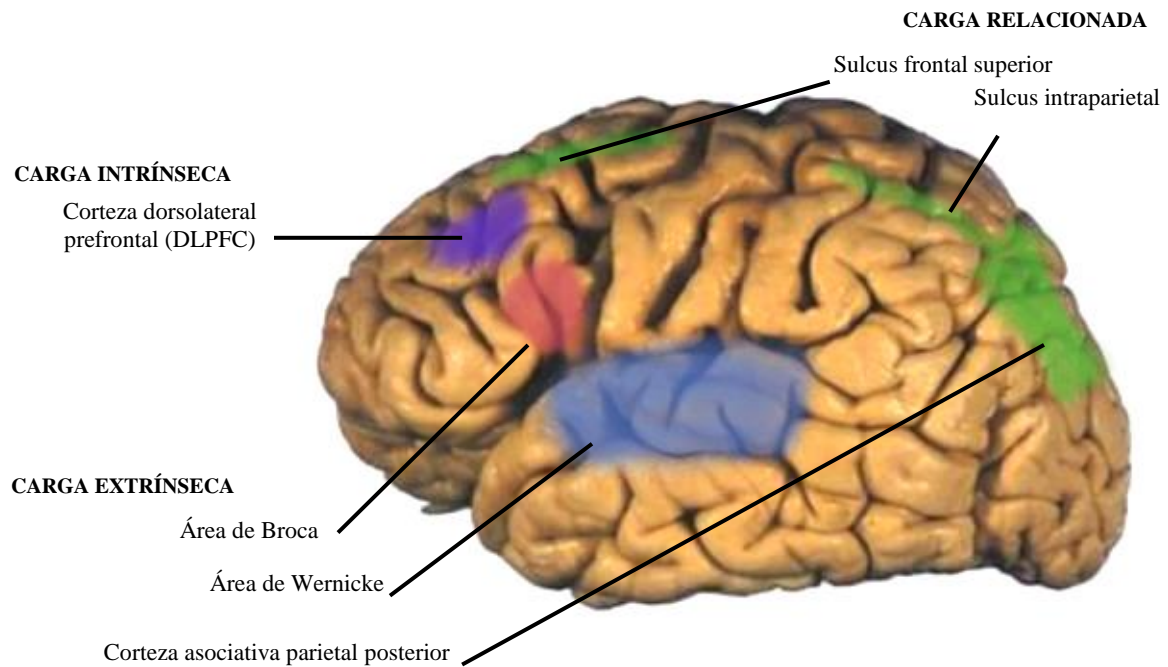


Figura 19.- Vista del lado derecho del cerebro mostrando las regiones involucradas con los distintos tipos de carga cognitiva. Imagen tomada de Whelan, 2006, p.5.

2.6 Conclusiones parciales

Estudios en memoria, atención y emoción se han beneficiado de las nuevas tecnologías, que permiten observar la actividad cognitiva del individuo en tiempo real.

Estudios adicionales son necesarios en la medición de los efectos que las diferentes cargas cognitivas.

Las nuevas tecnologías traen no sólo nuevas herramientas de estudio, sino también nuevos desafíos, ya que la distribución de contenidos va migrando a nuevos aparatos con características específicas que integran nuevas habilidades y requerimientos cognitivos, como es el caso de los teléfonos móviles de pantalla sensible al tacto, las *tablets* y las plataformas de videojuego que incluyen sensibilidad al movimiento del usuario.

El conocimiento previo que el sujeto tiene de algún tema es determinante en el nivel de la carga cognitiva que experimentará durante la realización de las tareas de aprendizaje; sin embargo existen otros factores que rodean la experiencia, como pueden ser elementos distractores del ambiente o una cada vez mayor tendencia a la multitarea (utilizar el celular para escribir o recibir un mensaje o una llamada mientras se despliega un contenido en la pantalla de la computadora, por ejemplo), es decir, a realizar múltiples tareas que en conjunto demandan grandes recursos cognitivos.

Diseñadores y desarrolladores no deben ignorar los avances en este campo, aunque sea de una manera general, ya que conforme se dan los avances tecnológicos las fronteras entre las diferentes disciplinas como el diseño, las ciencias de la computación, la neurociencia y la psicología se acercan y a veces se superponen.

CAPITULO III:
LA INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADORA

CAPITULO III: LA INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADORA

3.1 Introducción

Se eligió una interfaz cerebro computadora comercial como herramienta de medición en el experimento de este proyecto. La elección se basó en el número de sensores que el dispositivo tiene y en las capacidades que ofrece para registrar información de una manera no invasiva, así como para programar acciones utilizando la información que se detecta en tiempo real.

Una interfaz cerebro-computadora (BCI⁵² por sus siglas en inglés) es una comunicación directa entre el cerebro y un dispositivo externo en donde la computadora interpreta la actividad neuronal del usuario y le asocia una acción (Wang, 2009; Corrales Villanueva, 2009). Tradicionalmente, la investigación en este campo ha tenido como objetivo desarrollar dispositivos que permitan a personas con discapacidades motoras controlar mecanismos a través de una computadora para realizar tareas que les brinden autonomía. Sin embargo, nuevos campos de aplicación como la educación, los videojuegos, el entretenimiento, el arte y la investigación se abren ante la existencia de BCI comerciales de bajo costo.

Wolpaw et al. (en Graimann, Allison, Pfurtscheller, 2008, p.4) definen como: “*un dispositivo que provee al cerebro con un nuevo canal (no muscular) de control y comunicación*”.

Existen diversas clasificaciones para estas interfaces que dependen de factores relacionados a su operación. Entre las diversas divisiones, podemos mencionar las que consideran el tipo de señal utilizado y que separan las BCIs en *dependientes* (cuando utilizan los músculos como control) o *independientes* (cuando no dependen de ninguna actividad muscular). Según la tarea cognitiva se dividen en *pasivos* o *activos* (cuando el usuario produce la bioseñal activamente); según el tiempo de ejecución se clasifican en *sincrónicos* o *asincrónicos* y dependiendo de la forma en que registran la actividad cerebral pueden ser *invasivos* o *no invasivos* (Sabatini, s.f.).

⁵² Brain-computer interface, también es conocida como interface neural directa o interface cerebro-máquina (BMI por sus siglas en inglés).

3.2 Características generales

Cuando intentamos comunicarnos con la computadora o con otras personas, ciertas áreas del cerebro se activan y envían señales a través del sistema nervioso periférico (SNP) a los músculos. Una BCI es un sistema o vía alterna de este proceso natural, que mide directamente la actividad del cerebro asociada con las intenciones del usuario y las traduce en señales que controlan dispositivos asociados a estas interfaces. Podemos distinguir las siguientes características fundamentales: registran la actividad directamente del cerebro, proveen retroalimentación en tiempo real y el sistema debe depender de las intenciones del usuario (Graimann, Allison, Pfurtscheller, 2008, p.3-4).

Algunos autores (Graimann, Allison y Pfurtscheller, 2008) no consideran como BCIs a los sistemas que registran pasivamente las bioseñales sin proveer una acción en respuesta.

La calidad de una BCI depende de la satisfacción del usuario, pero también de factores como la tasa de transferencia de la información (en especial en los sistemas inalámbricos), el tiempo de entrenamiento que se requiere para que el sistema reconozca los patrones neuronales y realice la acción programada, la comodidad del aparato, la duración de la batería, la capacidad de detección y control que permitan, etc. (Sabatini, s.f.).

Las BCIs actuales utilizan la electroencefalografía para registrar la actividad del cerebro del usuario. El elemento fundamental de cada BCI es un algoritmo de traducción que convierte la entrada electrofisiológica del usuario en una salida para controlar los dispositivos externos (Baztarrica, 2002, p.18). La estructura de una BCI (Figura 20) involucra cuatro etapas relacionadas con la señal proveniente del cerebro: adquisición, pre-procesamiento, procesamiento y clasificación, reconocimiento y utilización de un algoritmo para generar una acción.

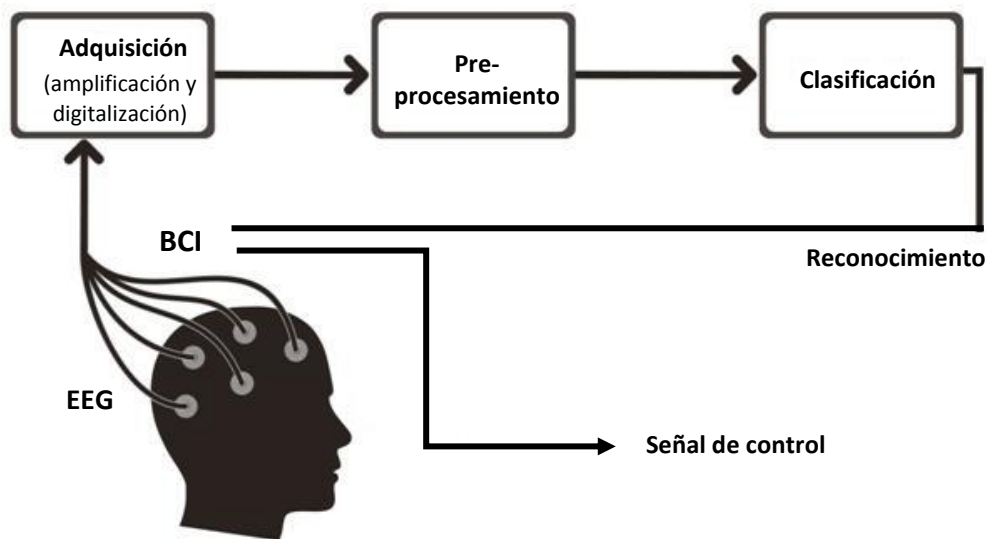


Figura 20.- Estructura de una interfaz cerebro-computadora.

Imagen tomada y modificada de Bobrov, Frolov, Cantor, Fedulova, Bakhnyan, Zhavoronkov, 2011

<http://www.plosone.org/article/slideshow.action?uri=info:doi/10.1371/journal.pone.0020674&imageURI=info:doi/10.1371/journal.pone.0020674.g001>

3.3 Las opciones de interfaces cerebro-computadora

Diversas universidades trabajan en este tema y desarrollan dispositivos con los que realizan investigaciones. Ejemplos de estas investigaciones: el proyecto *Direct Brain Interface*⁵³ (UM-DBI por sus siglas en inglés) de la Universidad de Michigan (Estados Unidos), el Laboratorio de Interfaces cerebro-computadora⁵⁴ del *Center for sensory-motor interaction* (SMI por sus siglas en inglés) en Dinamarca y el laboratorio del *Institute for Knowledge Discovery* de la Universidad de Graz⁵⁵ (en Austria). La lista⁵⁶ es larga e incluye países como Australia, Canadá, China, Egipto, Finlandia, Alemania, Japón, Estados Unidos, Reino Unido, y Francia, entre otros.

⁵³ <http://www.umich.edu/~umdbi/>

⁵⁴ <http://www.smi.hst.aau.dk/lab/bci/>

⁵⁵ <http://bci.tugraz.at/>

⁵⁶ Una lista de los diferentes países y enlaces a los proyectos que realizan en el tema puede consultarse en: <http://braincomputerinterface.weebly.com/other-bci-researchers-and-labs.html>

De manera adicional a estos proyectos, varias compañías han puesto en el mercado dispositivos de BCI de bajo costo, la mayoría diseñadas para el entretenimiento y los videojuegos. Éstos son los aparatos que tienen potencial para ser empleados en otras tareas, incluyendo la investigación, ya pueden adaptarse a otras funciones de manera relativamente sencilla. La mayoría funcionan de manera inalámbrica lo que permite al usuario moverse libremente y existe una gran variedad de aparatos, cada uno con características propias.

Algunas de las opciones en el mercado son:

a) *MindWave*^{MR} y *MindSet*^{MR} de la compañía *Neurosky*⁵⁷. Ambos aparatos utilizan un sensor seco (no requiere gel ni solución salina) y trabajan con los sistemas operativos de *Windows*^{MR} y *Macintosh*^{MR}. Registran el parpadeo del usuario, y los estados de atención y meditación. Permite a desarrolladores utilizar su plataforma, su librería de algoritmos y herramientas de software para la creación de aplicaciones, por lo que en su sitio de Internet pueden encontrarse aplicaciones de matemáticas, juegos, memoria, relajación, entre otras.

También otorga licencias de desarrollo, y recientemente salieron al mercado dos juguetes para niños que utilizan esta tecnología: *ForceTrainer*^{MR}, diseñado por *Uncle Milton Industries*, lee la actividad cerebral a través de una diadema y la traduce a una acción física; en este caso, el movimiento de una pelota de *ping pong* por un tubo de 25 centímetros. Cuando se alcanza un nivel de concentración lo suficientemente alto, la base sobre la que está el tubo inyecta un flujo de aire, que produce el movimiento de la pelota; y *MindFlex*^{MR}, de la compañía *Mattel* en el que de manera similar una pelota de *ping pong* se eleva con el flujo de aire inyectado en la base, dependiendo del grado de concentración del usuario, y debe superar una serie de obstáculos controlados manualmente por el jugador.

⁵⁷ <http://www.neurosky.com/>



MindWave^{MR}



MindSet^{MR}

Figura 21.- *MindWave^{MR}* y *MindSet^{MR}* de la compañía *Neurosky*.
Imágenes tomadas del sitio web de Neurosky, <http://www.neurosky.com/>



ForceTrainer^{MR}



MindFlex^{MR}

Figura 22.- *ForceTrainer^{MR}* de la compañía *Uncle Milton Industries Mattel* y *MindFlex^{MR}* de la compañía *Mattel*. Imágenes tomadas del sitio web de Neurosky, <http://www.neurosky.com/>

b) *Nia^{MR}* es un control para videojuegos de la compañía *OCZ Technology* que funciona con el sistema operativo Windows^{MR} (XP, Vista o 7). Tiene un giroscopio integrado y transforma los ritmos alfa, beta y gamma, las expresiones faciales y el movimiento de los ojos en comandos para los juegos en la computadora con un tiempo de reacción de entre 30 y 60 por ciento más rápido que con el mouse tradicional.



Figura 23.- *Nia^{MR}* de la compañía *OCZ Technology*
 Imágenes tomadas de <http://www.ocztechnology.com/nia-game-controller.html>

c) La campaña *Advanced Brain Monitoring* ha diseñado varios modelos del equipo *B-Alert^{MR}*. Esta interfaz requiere de una crema conductora para facilitar la transmisión de las señales EEG del cuero cabelludo a los sensores. Se ha utilizado en investigaciones con soldados y técnicos del ejército norteamericano para monitorear los estados cognitivos durante la realización de sus tareas y entrenamiento. Los productos se orientan a los ambientes educativos, del sector salud y militares. Entre las aplicaciones diseñadas se encuentran la detección y procesamiento de imágenes, los videojuegos de entrenamiento militar (*Neurogaming*) y una suite de tecnologías neuro-educativas adaptables e interactivas llamada *I-NET^{MR}* para incrementar la eficiencia y el ritmo del aprendizaje a través de tutoriales personalizados.



Figura 24.- *B-Alert^{MR}* de la compañía *Advanced Brain Monitoring*
 Imagen tomada de <http://www.b-alert.com>

d) La interfaz *EPOC^{MR}* desarrollada por *Emotiv* integra un giroscopio y funciona con el sistema operativo Windows^{MR}; registra las señales EEG a través múltiples sensores que se humedecen con agua salina y detectan pensamientos, emociones y expresiones

faciales. Otorga diferentes tipos de licencia lo que permite que investigadores y desarrolladores acceder a software desarrollado por la compañía y utilizarlo en su trabajo. Algunas aplicaciones están disponibles en su sitio web, como juegos, un organizador de imágenes basadas en estados emocionales, un mapeo en 3D de la actividad registrada por el aparato, un controlador del mouse, o un avatar que imita los gestos faciales del usuario, por mencionar algunas.

Esta es la interfaz que se seleccionó para el proyecto de investigación y que abordaremos en detalle en la siguiente sección.



Figura 25.- *EPOC^{MR}* de la compañía *Emotiv*
Imagen tomada de <http://www.emotiv.com/upload/media/>

3.4 El dispositivo *EPOC^{MR}*

Este aparato es de reciente lanzamiento al mercado y la compañía ha realizado algunas actualizaciones y mejoras al software que lo controla. Inicialmente se compró el *EPOC^{MR}* en su versión comercial, pero durante el desarrollo de este proyecto *Emotiv* comenzó a ofrecer licencias de desarrollo y licencias de investigación. Se adquirió la licencia de investigación, que da acceso a más herramientas de monitoreo.

3.4.1. Hardware

Cuenta con 14 sensores distribuidos (con el sistema internacional 10-20) en las partes frontal, temporal, parietal y occipital e integra un giroscopio y una batería recargable de litio (con duración aproximada de 12 horas). Los sensores son desmontables y utilizan piezas de fieltro absorbente que deben humedecerse con agua salina para optimizar la recepción de las señales. La señal inalámbrica emitida por esta diadema con sensores es recibida en una computadora a través de un dispositivo receptor USB.

Requerimientos técnicos para poder utilizar el dispositivo:

- Computadora con procesador 2.4 GHz Intel Pentium 4 (o equivalente).
- Sistema operativo *Microsoft* Windows XP (Service Pack 2), Windows Vista or Windows 7.
- Memoria RAM de 1GB
- 50MB de espacio disponible en el disco duro.
- Uno o dos puertos USB 2.0 disponibles (uno por cada dispositivo que se desee utilizar de manera simultánea).

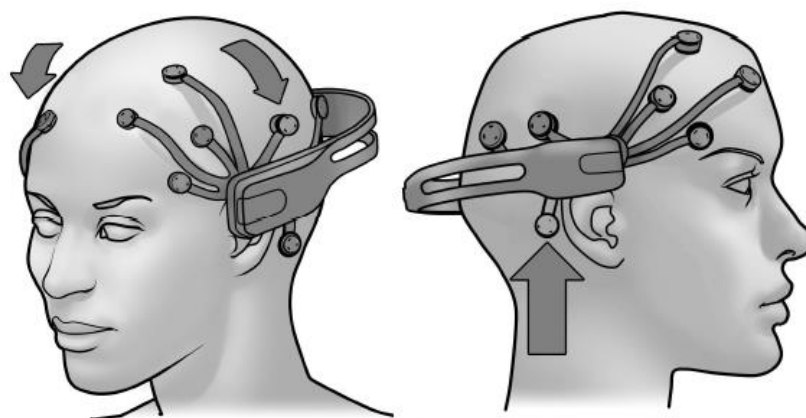


Figura 26.- Posicionamiento de la interfaz *EPOC^{MR}* de la compañía *Emotiv*
Imagen tomada de <http://emotiv.com/developer/SDK/UserManual.pdf>, p.13

El reconocimiento que hace la computadora del receptor USB es automático y no requiere ningún driver para su instalación.

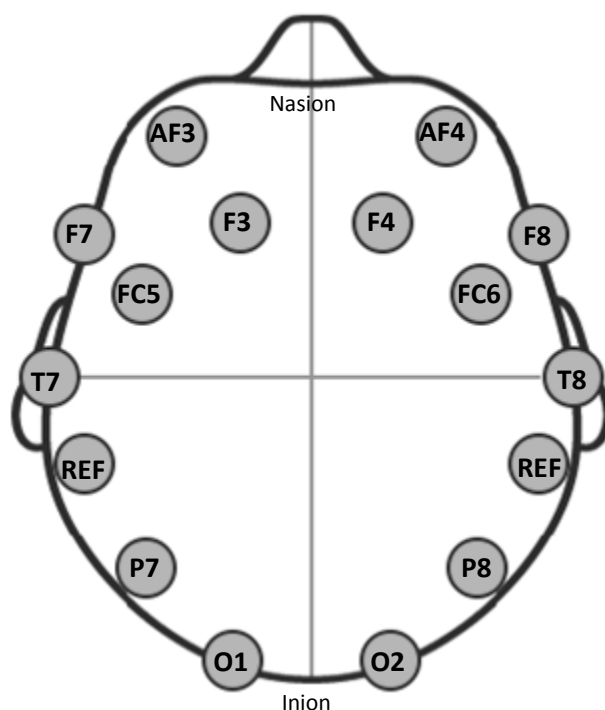


Figura 27.-Vista superior. Esquema de ubicación de los sensores de la interfaz *EPOC^{MR}* de *Emotiv* según el Sistema Estándar Internacional 10-20.

Imagen tomada la pantalla de la computadora del Panel de control de la interfaz y completada con información de <http://www.emotiv.com/upload/manual/sdk/Research%20Edition%20SDK.pdf>

3.4.2 Software

El equipo en la versión *Research Edition* utilizada en esta investigación, incluye software para su operación; y el panel de control (*Emotiv Control PanelTM*) administra la siguiente colección de programas (conocidas como *suites*):

- a) La suite *AffectivTM* monitorea los siguientes estados emocionales Frustración, meditación, entusiasmo instantáneo⁵⁸, entusiasmo de largo plazo⁵⁹, *engagement*⁶⁰ (o atención dirigida) y aburrimiento.

⁵⁸ se experimenta como una conciencia o sensación de estímulo positiva. Se caracteriza por una serie de respuestas fisiológicas (la dilatación de la pupila, el abrir más los ojos, el aumento en el ritmo cardíaco, la sudoración o la tensión muscular, entre otras) (Emotiv, 2011, p.28).

⁵⁹ se percibe de la misma manera que el entusiasmo instantáneo, pero está diseñada para detectar cambios en períodos de tiempo más largos (Emotiv, 2011, p.28).

La información se despliega en dos ventanas que muestran las mediciones en tiempo real de la información que se quiera desplegar: tiempo de visualización en segundos, emociones a detectar y color con el que se quiera distinguir las mediciones.



Figura 28.- Panel de la suite *Affectiv*^{MR} de la interfaz *EPOC*^{MR} de Emotiv
Imagen tomada de la pantalla de la computadora al utilizar el aparato.

b) La suite *Cognitiv*TM percibe e interpreta los pensamientos e intenciones conscientes del usuario de realizar una acción sobre un objeto real o virtual. Hay 13 acciones que se pueden programar, seis son movimientos direccionales, seis son rotaciones y hay uno más: la acción de desaparecer el objeto. Las acciones que detecta son empujar, jalar, mover a la derecha, mover a la izquierda, arriba, abajo, rotar en la dirección de las manecillas del reloj o en contra de las manecillas del reloj, rotar al frente o atrás, rotar a la izquierda o a la derecha y desaparecer. La suite reconoce cuatro acciones de manera simultánea, que pueden seleccionarse de un menú desplegable. Se requiere que el usuario practique y grabe cada acción en sesiones de entrenamiento, para la interfaz pueda reconocer el pensamiento o intención. Entre más sesiones de entrenamiento se graben para una misma acción, más certero será el reconocimiento de la misma. Una sesión de entrenamiento en estado neutral es necesaria, para reducir las posibilidades de

⁶⁰ se experimenta como un estado de alerta, como la atención dirigida conscientemente hacia un estímulo relevante de la tarea. Se caracteriza por un incremento en la sensación de estímulo y de las ondas beta (β) con una disminución de las ondas alfa (α) (Emotiv, 2011, p.28).

interpretaciones erróneas. Cada acción puede asignarse a un evento de control en la computadora.



Figura 29.- Panel de entrenamiento de la suite *Cognitiv^{MR}* de la interfaz *EPOC^{MR}* de *Emotiv*
Imagen tomada de <http://www.emotiv.com/upload/manual/sdk/Research%20Edition%20SDK.pdf>, p.30

c) La suite *ExpressivTM* interpreta las señales provenientes del equipo y reconoce las expresiones faciales del usuario en tiempo real. Detecta el parpadeo, el guiño del ojo derecho y del ojo izquierdo, el movimiento de la mirada hacia la derecha y hacia la izquierda, levantar las cejas o fruncir el entrecejo, sonreír ampliamente, reír, apretar los dientes, y sonreír hacia el lado derecho o izquierdo de la cara.

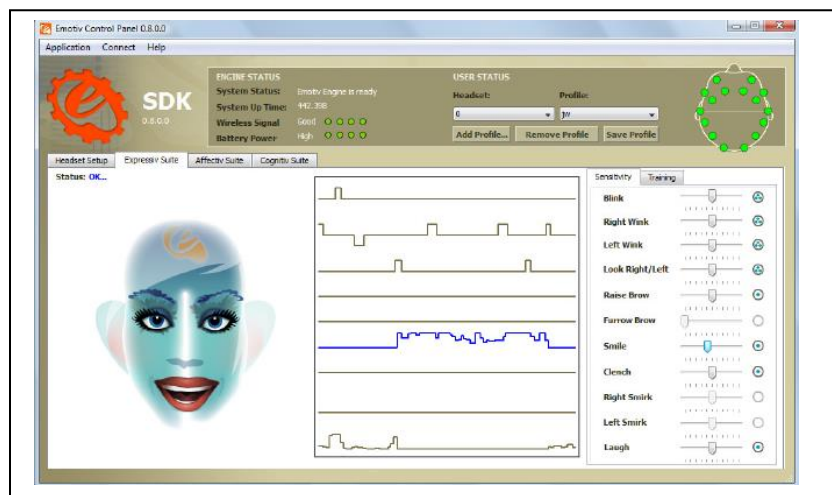


Figura 30.- Panel de ajuste de la suite *Expressiv^{MR}* de la interfaz *EPOC^{MR}* de *Emotiv*
Imagen tomada de <http://www.emotiv.com/upload/manual/sdk/Research%20Edition%20SDK.pdf>, p.24

La sensibilidad de detección puede ajustarse y también pueden grabarse sesiones breves de entrenamiento para que se distingan los gestos del usuario con mayor precisión. Cada expresión detectada puede asignarse a una acción en la computadora, como por ejemplo controlar un dispositivo, manipular el movimiento de un mecanismo o programar un avatar que imite las expresiones del usuario.

Cada función que fue entrenada y grabada pueden eliminarse, en caso que el usuario desee introducir un patrón de pensamiento o expresión facial distinta. Esto resulta de utilidad cuando sentimos que una función no es reconocida con precisión, y preferimos entrenarla nuevamente y guardar la nueva información en la base de datos de la interfaz para su posterior reconocimiento.

Los datos detectados y mostrados en estas suites sólo pueden ser visualizados. Esta parte de la interfaz no permite guardarlos para su posterior análisis.

La interfaz incluye además otras herramientas:

d) Emotiv *EmoEngine*TM monitorea el estado general del aparato, indicando si está o no conectado al panel de control (*Emotiv Control Panel*TM), el tiempo que lleva conectado al receptor USB, la calidad de la señal inalámbrica y el estado de la batería. Permite seleccionar, eliminar o agregar perfiles de usuario (para acceder a información relacionada con cada usuario), y cuenta con un esquema a color que muestra en tiempo real el nivel de transmisión de información de cada sensor del dispositivo. El código de color que representa la calidad de la transmisión es el siguiente:

negro (no se detecta la señal), rojo (señal muy pobre), naranja (señal pobre), amarilla (una señal adecuada) y verde (buena calidad de señal)

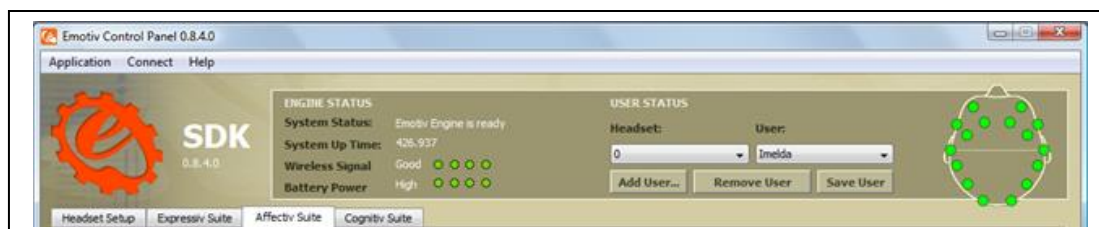


Figura 31.- Emotiv *EmoEngine*TM
Imagen tomada de la pantalla de la computadora al utilizar el aparato.

e) *EmoKey*TM enlaza el dispositivo con otras aplicaciones al convertir los eventos (señales detectadas y reconocidas) en cualquier combinación de teclas del teclado de la computadora. Expresiones faciales, estados emocionales o intenciones pueden asociarse a acciones específicas en un juego, un procesador de textos, un microcontrolador o cualquier otra aplicación que acepte información de entrada del teclado. *EmoKey*TM se conecta al panel de control (*Emotiv Control Panel*TM), para poder seleccionar el perfil del usuario y disponer de los datos de reconocimiento guardados en las sesiones de entrenamiento. Este software se utilizó en el experimento de esta investigación.

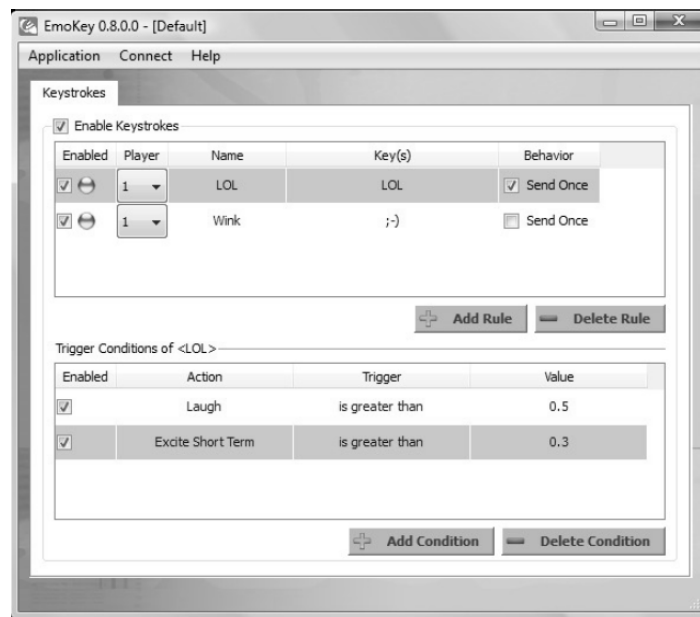


Figura 32.- Panel de control de *EmoKey*TM

Imagen tomada de <http://www.emotiv.com/upload/manual/sdk/Research%20Edition%20SDK.pdf>, p.35

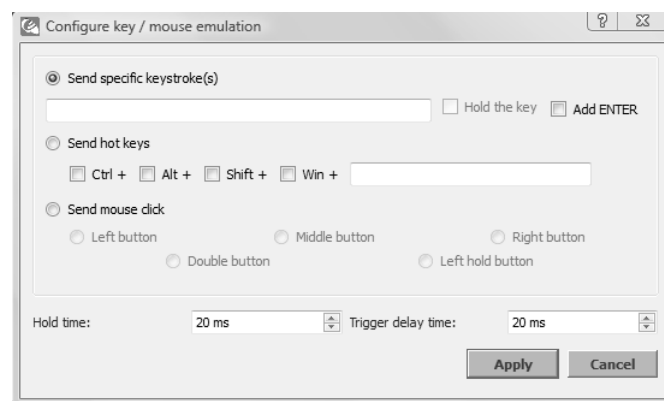


Figura 33.- Ventana de configuración de *EmoKey*TM

Imagen tomada la pantalla de la computadora al ejecutar la aplicación.

El equipo cuenta con otros programas⁶¹ (*EmoComposer™*, *EmoScript™* y un emulador de *mouse*) que no fueron utilizados en este proyecto pero que son herramientas para desarrolladores.

EmoComposer™ simula la conducta del Emotiv *EmoEngine™* y de las diademas lectoras (*EPOC™*). Ayuda a los desarrolladores a probar sus aplicaciones en los estados tempranos de desarrollo. Tiene dos opciones de uso el modo interactivo (para simular los dispositivos y probar las aplicaciones) y el modo *EmoScript™*, mucho más enfocado a programar la repetición definida de los estados del equipo sobre cualquier aplicación (la programación se hace con *EmoComposer™ Markup Language*).

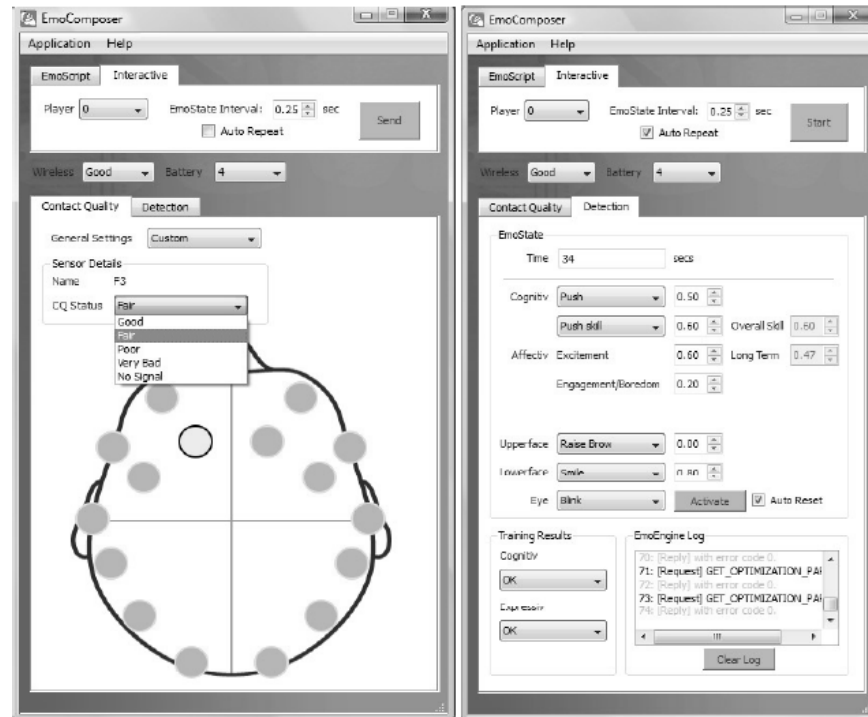


Figura 34.- Panel de control de EmoComposer™ en el modo Interactivo

Imagen tomada de <http://www.emotiv.com/upload/manual/sdk/Research%20Edition%20SDK.pdf>, p.39

⁶¹ Es posible programar software compatible con los dispositivos *EPOC™* si se los programas se desarrollan en C++ y se compilan con *Microsoft Visual Studio 2005* o con *Visual Studio 2008*.

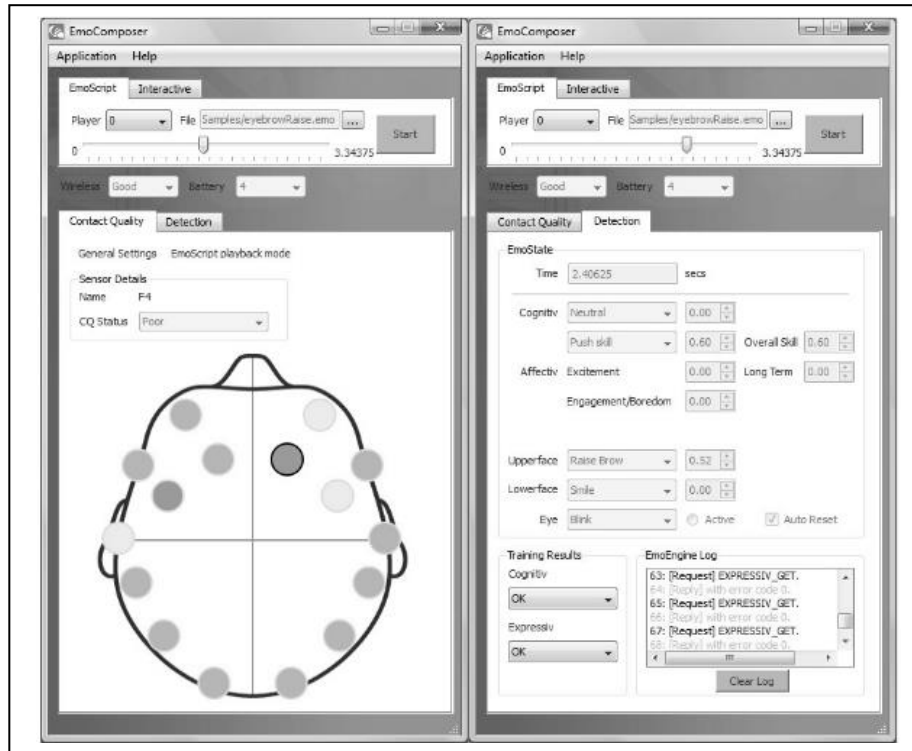


Figura 35.- Panel de control de EmoComposer™ en el modo EmoScript™

Imagen tomada de <http://www.emotiv.com/upload/manual/sdk/Research%20Edition%20SDK.pdf>, p.40

h) TestBench™ 1.5

Este software es exclusivo para las ediciones de investigación (*Research Edition*). Permite visualizar las señales captadas en cada uno de los 14 sensores, así como las ondas delta, teta, alfa y beta; y grabar la sesión en un archivo para su posterior análisis. Los archivos de salida tiene el formato .edf y las sesiones pueden exportarse como un archivo csv.

Puede reproducir archivos grabados previamente. Los canales que registra: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4 corresponden al Sistema Estándar Internacional 10-20.

La tabla 4 presenta las características técnicas que ofrece esta edición. Información más detallada se puede consultar en el manual⁶² de usuario.

⁶² <http://www.emotiv.com/upload/manual/sdk/Education%20Edition%20SDK.pdf>

Tabla 5.- Características técnicas de la edición de investigación y el software *TestBench*TMv1.5
 Tabla tomada del manual de usuario, p.4.
<http://www.emotiv.com/upload/manual/sdk/Education%20Edition%20SDK.pdf>

	SDK HEADSET
Number of channels	14 (plus CMS/DRL references, P3/P4 locations)
Channel names (International 10-20 locations)	AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4
Sampling method	Sequential sampling. Single ADC
Sampling rate	128 SPS (2048 Hz internal)
Resolution	16 bits (14 bits effective) 1 LSB = 1.95 μ V
Bandwidth	0.2 - 45Hz, digital notch filters at 50Hz and 60Hz
Filtering	Built in digital 5th order Sinc filter
Dynamic range (input referred)	256mVpp
Coupling mode	AC coupled
Connectivity	Proprietary wireless, 2.4GHz band
Power	LiPoly
Battery life (typical)	12 hours
Impedance Measurement	Contact quality using patented system

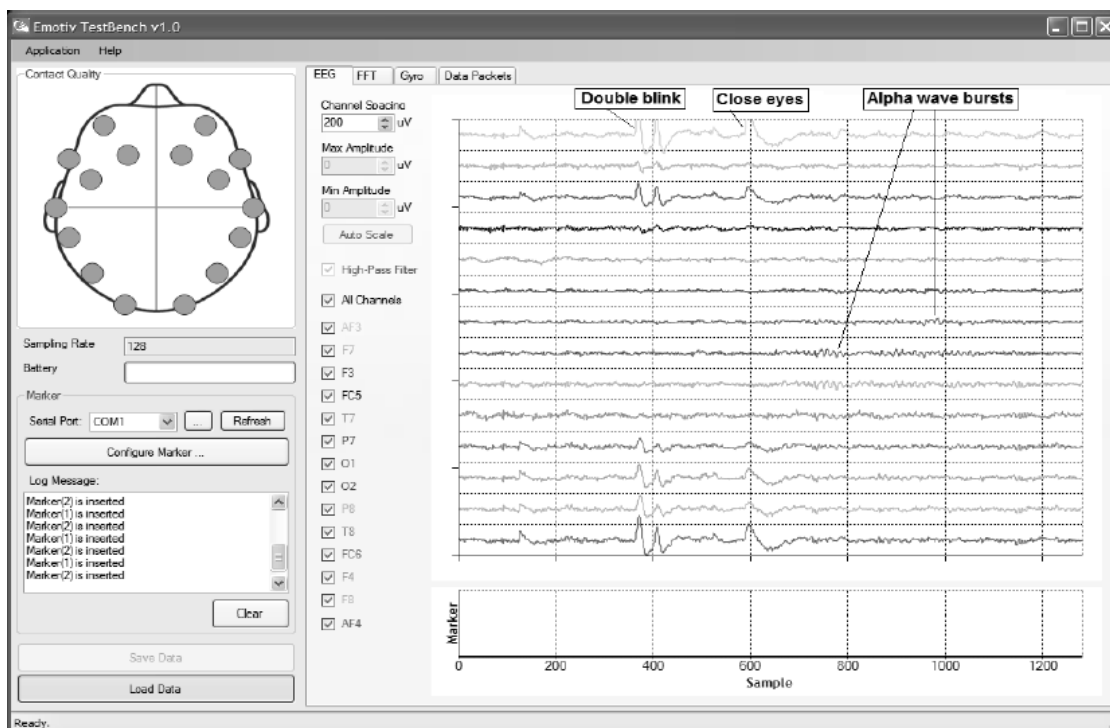


Figura 36.- Panel de monitoreo de los 14 canales de *TestBench*TMv1.5
 Imagen tomada del manual de usuario, p. 5
<http://www.emotiv.com/upload/manual/sdk/Education%20Edition%20SDK.pdf>

3.4.3 Algunas limitaciones para la investigación

Integrando la información del Capítulo II (Memoria, atención, emoción y carga cognitiva) con las características de este dispositivo, pudimos identificar algunas áreas relacionadas con funciones cognitivas y asociarlas a los canales correspondientes.

La Figura 37 muestra el esquema de distribución (Sistema Estándar Internacional 10-20) de los sensores, algunas áreas de color que identifican grupos de sensores cuyas lecturas se asocian a actividades cognitivas. De esta manera, tenemos un primer grupo ubicado en los lóbulos frontales (AF3, AF4, F3, F4, F7, F8, FC5, FC6) que corresponderían a la función de razonamiento. Un segundo grupo localizado en los lóbulos parietales y frontales (P7, P8, AF3, AF4, F3, F4, F7, F8, FC5, FC6) asociado a la memoria de corto plazo; un tercer grupo sobre los lóbulos temporales (T7, T8) asociados a funciones de memoria y lenguaje.

Un cuarto grupo sobre los lóbulos parietales (P7, P8) asociado a la atención; un quinto grupo relacionado con las relaciones visoespaciales y que se relaciona con los lóbulos parietales y occipitales (P7, P8, O1, O2) y otro grupo sobre los lóbulos occipitales (O1, O2) asociados a las habilidades visoespaciales (como identificar objetos). La tabla 5 resume la información.

Tabla 6.- Distribución de grupos de canales y su asociación con los lóbulos cerebrales y algunas funciones cognitivas

Tabla formada con la información tomada del Capítulo 2 de esta tesis.

Grupo	Lóbulos	Canales	Función cognitiva esperada
1	frontales	AF3, AF4, F3, F4, F7, F8, FC5, FC6	razonamiento
2	parietales y frontales	P7, P8, AF3, AF4, F3, F4, F7, F8, FC5, FC6	memoria de corto plazo
3	temporales	T7, T8	memoria y lenguaje
4	parietales	P7, P8	atención
5	parietales y occipitales	P7, P8, O1, O2	relaciones visoespaciales
6	occipitales	O1, O2	habilidades visoespaciales (como identificar objetos).

A pesar de que nuestro experimento se concentra en el análisis de datos asociados a estados emocionales específicos (frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de

largo plazo), presentamos esta información al lector como muestra del amplio campo de investigación que se puede abarcar con esta interfaz.

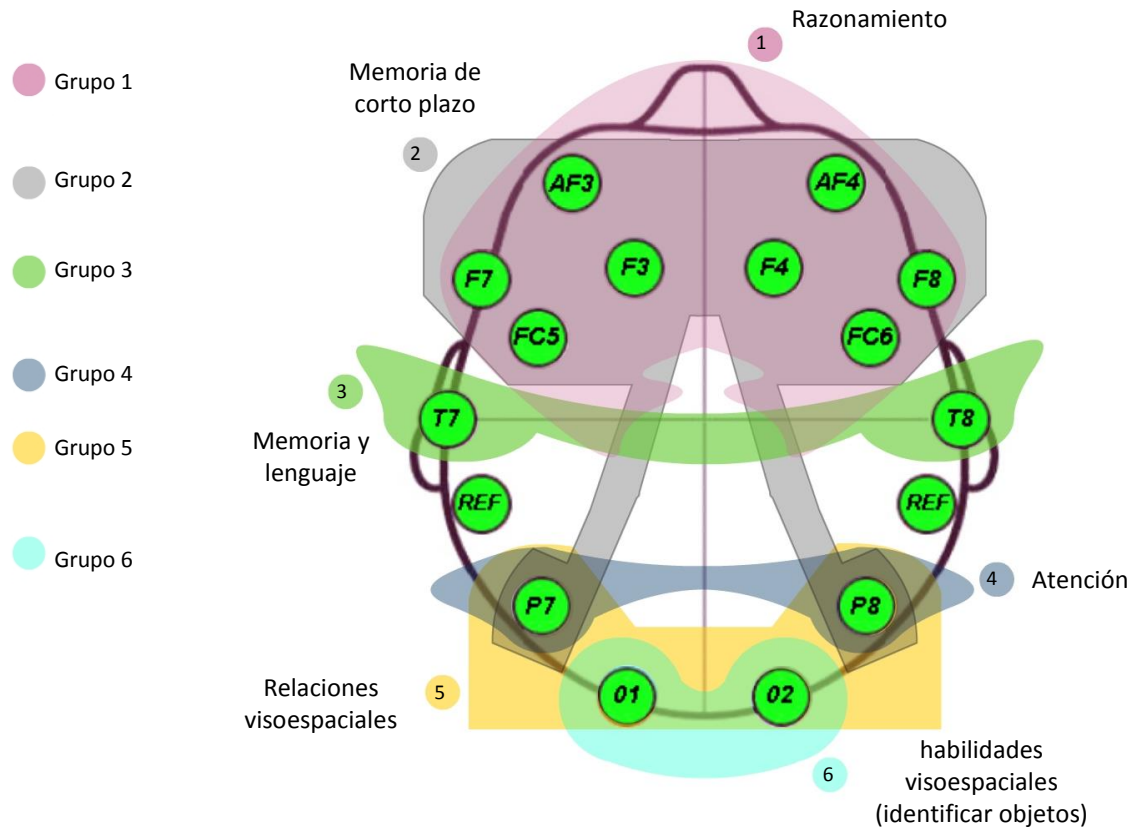


Figura 37.- Esquema de ubicación de los sensores de la interfaz *EPOC^{MR}* de *Emotiv* según el Sistema Estándar Internacional 10-20 y su esperada relación con funciones cognitivas. Imagen tomada la pantalla de la computadora del Panel de control de la interfaz y completada con información de la Tabla 8.

Entre las limitaciones que esta tecnología presenta a los diseñadores, podemos mencionar lo siguiente:

- El registro de información de cada sensor (EEG) requiere del software incluido en la licencia de investigación, que tiene un costo adicional a la versión comercial de la interfaz.
- El completo dominio de esta interfaz requiere capacitación adicional en lectura de electroencefalogramas. Al ser un dispositivo relativamente nuevo hay poca literatura al respecto y los manuales de usuario son demasiado generales.

- El dispositivo utiliza sensores húmedos, por lo que se requiere humedecer pequeñas piezas de fieltro con agua salina y colocarlas en cada sensor para asegurar una buena transmisión de la señal.
- El receptor inalámbrico es sensible a la interferencia ambiental, en especial las emisiones de otros aparatos inalámbricos.

3.4.4. Posibles aplicaciones de esta tecnología

Dentro de las tres áreas que registra el dispositivo (estados emotivos, cognitivos y expresiones faciales) es posible encontrar un amplio campo para la investigación. Esta herramienta podría utilizarse para evaluar interfaces gráficas, desarrollar tutoriales adaptables o avatares interactivos inteligentes; estudiar cómo se relacionan los estados emocionales y cognitivos en la realización de diferentes tareas, o cómo reaccionan los individuos ante el trabajo colaborativo. Puede utilizarse como herramienta de producción de nuevos contenidos lúdicos, basados en las respuestas emocionales del usuario y una programación previa que permita una base de datos con elementos gráficos y/o sonoros de los cuales disponer para las creaciones personalizadas. También podría realizarse investigación de su aplicación en el campo de la seguridad digital, como elemento de autenticación del usuario o para la atención de discapacidades motrices como controlador de interfaces y de mecanismos.

Tiene potencial para explorar su interacción con otras tecnologías como la realidad virtual o la realidad aumentada, por mencionar algunas. Sugerimos como área de exploración adicional, la mercadotecnia. La disciplina de la neuro-mercadotecnia (*neuromarketing*) utiliza lectores de EEG de gorro con múltiples canales y conectados a una computadora para saber la respuesta neurológica de los consumidores ante los mensajes publicitarios. La compañía NeuroFocus ha lanzado al mercado su lector de EEG inalámbrico llamado *MyndTM*, compatible con *i-PhoneTM* e *i-PadTM*, que utiliza sensores secos que cubren toda el área del cerebro, y que satisface los estándares para producir lecturas de alta precisión de nivel clínico. Resulta de interés explorar las capacidades de *EPOCTM* en este terreno.



Figura 38.- Imágenes del escáner cerebral Mynd^{MR} de la compañía NeuroFocus
Imágenes tomadas de <http://www.fastcompany.com/1741403/mynd-neuromarketing-ipad-iphone-neurofocus-brain-scan>.

3.5 Conclusiones parciales

Nuevos aparatos salen al mercado diseñados para una función comercial específica, pero sus características los hacen apropiados para aplicarlos a otras disciplinas. El caso de las BCIs es un ejemplo. Ofrecen oportunidades para explorar su aplicación en el campo del diseño, la educación, el entretenimiento y la inteligencia artificial.

Es importante tomar las ventajas de estas tecnologías, que pueden operarse con relativa facilidad, ya que fueron diseñadas para el público general. Aún así es conveniente incrementar las habilidades a través del estudio y la capacitación, lo que permitirá aprovechar aún mejor los recursos y realizar investigaciones más profundas.

La interfaz seleccionada para este proyecto es el dispositivo *EPOCTM* de la compañía *EmotivTM*.

Entre las características del aparato que influyeron en la decisión, podemos mencionar las siguientes:

- El número de sensores superó por mucho los de las otras opciones, con 14 de ellos distribuidos de manera que permiten tomar lecturas de los diferentes lóbulos cerebrales.
- Distingue once expresiones faciales en el usuario y es posible personalizar el nivel de sensibilidad en la detección.

- Reconoce seis estados emocionales (frustración, meditación, entusiasmo instantáneo, entusiasmo de largo plazo, atención dirigida y aburrimiento) y despliega las mediciones en una gráfica en tiempo real.
- Permite el control de acciones programadas asociadas a pensamientos específicos.
- Ofrece una licencia de Investigación que permite acceder a la información que se registra en tiempo real en cada sensor (EEG), y a los diferentes tipos de oscilaciones EEG.
- El mantenimiento y manejo del dispositivo es sencillo.
- Pueden programarse y desarrollarse aplicaciones que se adapten a esta interfaz.

Es una herramienta que ofrece un amplio rango de posibilidades de detección, registro y control, lo que la convierte en un dispositivo atractivo para realizar investigaciones posteriores.

La investigación con BCIs bajo la perspectiva del diseño está en sus inicios y existe un nicho de consumidores de aplicaciones que irá creciendo conforme estas interfaces lleguen a públicos mayores. Los inconvenientes que presenten los modelos actuales serán superados, ya que esta industria está evolucionando rápidamente, haciendo que las fronteras entre el diseño, las ciencias de la computación y la psicología se entretejan.

CAPITULO IV: METODOLOGÍA

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

4.1 Antecedentes

Investigaciones previas en el campo del aprendizaje multimedia y el diseño instruccional multimedia sugieren la posibilidad de controlar factores relacionados con el diseño para apoyar al estudiante en su actividad de aprendizaje. Diversos principios han sido propuestos e investigados en los últimos años. Estos lineamientos nos sugieren cómo tratar la información, los medios y las condiciones que influyen en el desarrollo de aplicaciones educativas multimedia. Por otro lado, la neurociencia presenta una faceta más completa de los procesos que se llevan a cabo en el cerebro durante el aprendizaje. Los estudios de la actividad del cerebro, así como el monitoreo de sus funciones no son nuevos. Sin embargo, los avances en la tecnología han ampliado el horizonte de aplicación de esta actividad, y la comercialización de interfaces cerebro computadora con fines lúdicos ha permitido que investigadores de diversas disciplinas las integren a sus proyectos.

4.2 Planteamiento y delimitación del problema

Los sistemas educativos y los entornos virtuales de aprendizaje con frecuencia enfrentan un problema: cómo saber si un material didáctico multimedia presenta al usuario un manejo adecuado de la información, de los elementos visuales y auditivos de la interfaz y si esta favorece el procesamiento de la información en la mente del usuario.

Por lo general, los sistemas multimedia educativos administran la interacción entre el sujeto y el contenido basándose en las entradas de información que el sistema recibe del usuario. Estas entradas pueden ser acciones provenientes del teclado, el mouse, el micrófono y/o la pantalla, cuando esta es sensible al tacto (*touchscreen*).

Los sistemas multimedia educativos no detectan si el usuario está prestando atención al despliegue del contenido o si considera la actividad que está realizando aburrida o gratificante. La respuesta del usuario ante los estímulos de la aplicación multimedia está limitada al tipo de información de entrada (input) que el sistema recibe. De esta manera se pierde gran cantidad de información valiosa para diseñadores y desarrolladores, como la motivación, la frustración o la carga cognitiva que experimenta al procesar la información

Un primer paso para lograr diseños instruccionales más adecuados a las actividades y respuestas del usuario consistiría en diseñar sistemas interactivos capaces de recibir una gama más amplia de información de entrada (input) por parte del usuario en tiempo real e interpretar dicha información para administrar la interacción y el despliegue de los contenidos educativos.

Las interfaces cerebro-computadora detectan y registran la actividad cerebral del usuario y la transforman en acciones programadas previamente. El dispositivo seleccionado para este proyecto detecta diversos tipos de respuesta del usuario (expresiones faciales, estados emocionales y estados cognitivos), por lo que delimitaremos la información recibida del usuario a estados emocionales específicos (la frustración, el entusiasmo instantáneo y el entusiasmo de largo plazo).

Las interfaces cerebro-computadora pueden ser un instrumento de investigación para diseñadores y desarrolladores de material multimedia; una herramienta en el diseño de contenido interactivo.

4.3 Preguntas de investigación

Considerando el planteamiento y la delimitación del problema consideramos relevante dar respuesta a las siguientes preguntas:

¿Podemos obtener evidencia cuantitativa de las reacciones del usuario ante una tarea?

¿Existe una relación entre los estados emocionales que experimenta el usuario (frustración y entusiasmo) y la complejidad en la solución de una tarea?

¿De qué manera se relacionan entre sí la frustración y el entusiasmo (instantáneo y de largo plazo) cuando se resuelve una tarea?

¿Pueden utilizarse la herramienta *EmoKeyTM* y la Suite *AffectivTM* como forma de registro la información de los estados emocionales del usuario para su posterior análisis?

4.4 Objetivo específico

El objetivo de esta investigación es generar conocimiento aplicable al diseño de sistemas interactivos a través de un experimento que pretende aclarar la relación que existe entre el nivel de complejidad de una tarea y las reacciones que ante ella presenta el usuario (la frustración, el entusiasmo instantáneo y el entusiasmo de largo plazo).

4.5 Justificación

Consideramos relevante el diseño de sistemas interactivos que tomen en consideración las respuestas del usuario para administrar la interacción y el despliegue de los contenidos con la finalidad de favorecer la atención y la memoria y consecuentemente, el aprendizaje.

4.6 Definición de la investigación

El proyecto inició con una perspectiva exploratoria orientada a las interfaces cerebro computadora de tipo comercial, por lo que cuenta con elementos exploratorios en el tercer capítulo, en lo referente al dispositivo *EPOC^{MR}*, a las herramientas de software que le acompañan y a las que forman parte de la licencia de investigación.

Sin embargo consideramos que reúne las características de una investigación de tipo correlacional, ya que mide los niveles de emociones específicas y analiza si existe una relación entre las variables y si su variación sigue algún patrón sistemático entre sí.

4.7 Las Hipótesis

En esta investigación se plantea que al solucionar una tarea (que va incrementando el nivel de complejidad):

- a) existe una variación entre los niveles de frustración y el incremento de la complejidad de esa actividad.
- b) existe una variación entre los niveles de entusiasmo instantáneo y el incremento de la complejidad de la misma actividad.
- c) existe una variación entre los niveles de entusiasmo de largo plazo y el incremento de la complejidad de la actividad.

d) existe una correlación entre los niveles de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo en cada etapa de la tarea.

Hipótesis:

1.- Hipótesis nula H_{O1}

No existe una variación entre los niveles de frustración de la prueba sencilla y los niveles de frustración de la prueba compleja

$$\text{Frustración}_{\text{PruebaSencilla}} = \text{Frustración}_{\text{PruebaCompleja}}$$

2.- Hipótesis nula H_{O2}

No existe una variación entre los niveles de entusiasmo instantáneo de la prueba sencilla y los niveles de entusiasmo instantáneo de la prueba compleja

$$\text{EntusiasmoInstantáneo}_{\text{PruebaSencilla}} = \text{EntusiasmoInstantáneo}_{\text{PruebaCompleja}}$$

3.- Hipótesis nula H_{O3}

No existe una variación entre los niveles de entusiasmo de largo plazo de la prueba sencilla y los niveles de entusiasmo de largo plazo de la prueba compleja

$$\text{EntusiasmoLargoPlazo}_{\text{PruebaSencilla}} = \text{EntusiasmoLargoPlazo}_{\text{PruebaCompleja}}$$

4.- Hipótesis nula H_{O3}

No existe una correlación entre los niveles de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo en cada etapa de complejidad de la prueba.

$$r(\text{Frustración}, \text{EntusiasmoInstantáneo}, \text{EntusiasmoLargoPlazo}) = 0$$

4.8 Las Variables

Las variables dependientes (Frustración, Entusiasmo Instantáneo y Entusiasmo de largo plazo) pueden adquirir valores en un rango numérico de 0 a 100, por lo que son de tipo cuantitativo.

La variable independiente es de tipo cualitativo o categórico, y puede adquirir uno de los cuatro estados: A, B, C o D correspondientes a cuatro diferentes laberintos que el usuario soluciona en el experimento.

4.9 Planteamiento del experimento

En este proyecto se construye una situación que es posible replicar en la que la variable independiente es manipulada para analizar los efectos que se obtienen sobre las variables dependientes.

Es un estudio no aleatorizado o de control parcial (Anderson *et al.*, 1980 en Bono Cabré, s.f, p.4), ya que los participantes fueron voluntarios que se presentaron como respuesta a una convocatoria abierta, por lo que no cumplen con el requisito de una selección estrictamente aleatoria.

Se presenta un cuasi experimento con la ausencia de medidas pre-tratamiento en donde un grupo único fue expuesto a los cuatro estados de la variable independiente para posteriormente realizar la comparación de los datos obtenidos entre los sujetos del grupo (comparación intra-sujetos).

Las limitaciones del contexto hacen imposible aplicar el ideal de experimentación, ya que los recursos disponibles son determinantes en la obtención del completo control de las condiciones involucradas en el experimento.

4.10 La muestra

Una revisión de diversos estudios de EEG muestra que los grupos de individuos son relativamente pequeños⁶³. Hay estudios con grupos desde seis individuos (Rodríguez Bermúdez, García Laencina, Brizi6n, Roca Dorda, s.f.) hasta 50 o más sujetos (Loughran et. al, 2005).

El tamaño de los grupos repercute en el margen de error que se estima obtener en el estudio. También influye el número de electrodos y algunos consideran que es importante el tipo de electrodos utilizados (secos o húmedos) (Mange y Fernández, 2011). Algunas compañías consultoras de neuromarketing (como *Sands Research*) consideran grupos de muestra de "30 o 40 sujetos por cada grupo demográfico para obtener resultados con un margen de 1% de error con la tecnología EEG" (Sands, 2009 en Monge y Fernández, 2011, p.32).

⁶³ Se utilizan grupos de diez (Fritzer et. al., 2007 y Hung et. al., 2007), trece (Hinrikus, 2007), dieciséis (Huber et. al., 2002), veinte (Curcio et. al., 2005), veinticuatro (Croft, Chandler et. al, 2002) y hasta cincuenta individuos (Loughran et al, 2005). (McLaughlin Centre for Population Risk Assessment, s.f.). Estudios EEG, <http://www.rfcom.ca/clinic/eegsp.shtml>.

En general, se considera favorable incrementar el tamaño de la muestra ya que los grupos reducidos tienden a generalizar resultados que podrían estar limitados a un subgrupo de la población (Monge Benito, Fernández Guerra, 2011).

El tamaño de la muestra en este proyecto es de dieciséis⁶⁴ individuos, doce varones y cuatro mujeres (todos ellos diestros y estudiantes universitarios).

La Tabla 7 resume los datos de los sujetos encuestados e incluye sexo, edad, programa de estudio y experiencia previa con videojuegos. Las edades de los participantes están en un rango entre 19 y 34 años. Y el promedio de edad es de 23.75 años.

Tabla 7.- Datos generales de los voluntarios que participaron en el experimento.

Participante	sexo	edad		estudiante	experiencia videojuegos
s1	masculino	24	diestro	Computación	si
s2	femenino	23	diestro	Ing.Química	no
s3	masculino	22	diestro	Ing.Eléctrica	si
s4	masculino	25	diestro	Ing.Civil	si
s5	masculino	22	diestro	Ing. Computación	si
s6	masculino	25	diestro	Computación	si
s7	femenino	20	diestro	Ing. Computación	si
s8	masculino	23	diestro	Computación	si
s9	masculino	31	diestro	Computación	si
s10	femenino	19	diestro	Ing. Electrónica	no
s11	masculino	24	diestro	Derecho	si
s12	femenino	19	diestro	Derecho	si
s13	masculino	23	diestro	Ing. Mecánica	si
s14	masculino	24	diestro	Ing. Química	si
s15	masculino	22	diestro	Electrónica	si
s16	masculino	34	diestro	Ing. Industrial	si

```

> edades <- c(24,23,22,25,22,25,20,23,31,19,24,19,23,24,22,34)
> summary(edades)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 19.00  22.00   23.00   23.75  24.25   34.00

```

Figura 39. Rango y promedio de las edades. Datos introducidos y manejados en la plataforma R.

⁶⁴ Diecisiete sujetos fueron puestos a prueba. Pero las mediciones del sujeto número 12 quedaron incompletas y tuvieron que ser desechadas, ya que la batería del dispositivo se agotó durante la sesión.

4.11 Conclusiones parciales

Las interfaces cerebro-computadora pueden ser un instrumento de investigación para diseñadores y desarrolladores de material multimedia ya que al ser capaces de monitorear la actividad del cerebro mientras se soluciona una tarea, abren un campo de exploración para determinar su utilidad como interfaces administradoras de contenidos e interacción, basadas en las entradas de información que el sistema recibe del usuario en tiempo real.

Nuestro objetivo es generar conocimiento aplicable al diseño de sistemas interactivos utilizando como experimento una plataforma con laberintos de diferentes niveles de dificultad que aspira a aclarar la relación entre el nivel de complejidad y las reacciones de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo que presenta el usuario al resolver los laberintos.

El proyecto inició como exploratorio de las interfaces cerebro computadora de tipo comercial y reúne las características de una investigación de tipo correlacional. Plantea como hipótesis que los estados emocionales (niveles de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo) varían si se varía la complejidad de la tarea; y que existe una correlación entre los niveles de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo en cada etapa de la tarea.

Identifica como variable independiente (cualitativa) a los estados de la tarea correspondientes a cuatro laberintos, y como variables dependientes (cuantitativas) los niveles de los estados emocionales de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo. Este estudio no aleatorizado presenta un cuasi experimento con la ausencia de medidas pre-tratamiento; la muestra de dieciséis estudiantes universitarios (todos diestros), doce varones y cuatro mujeres con un promedio de edad de 23.75 años fue expuesta a los cuatro estados de la variable independiente para posteriormente realizar la comparación de los datos obtenidos entre los sujetos del grupo.

CAPITULO V:

RESULTADOS

CAPITULO V: RESULTADOS

5.1 Introducción

La obtención de datos para su posterior análisis estadístico requirió de equipo adicional a la interfaz. Se diseñó e implementó una plataforma con movimiento sobre la que se colocaron los cuatro estados de la variable independiente (cuatro laberintos), que el usuario requería resolver manipulando la inclinación de la plataforma a través del teclado de una computadora. Se describen las herramientas de software y hardware utilizadas, los instrumentos de medición, el análisis estadístico de los datos y la distribución de la variable cuantitativa.

5.2 Procedimiento para la recolección de datos

El equipo se dividió en dos módulos de trabajo. Un módulo se dedicó a la interacción del sujeto con el material de prueba, y otro módulo se utilizó para la recopilación de los datos generados durante la prueba. En el primer módulo, los voluntarios interactuaron con la plataforma móvil de los laberintos a través del teclado de una laptop *Vaio*TM que mostraba en su pantalla el monitor serial (que no requería la atención del usuario). La computadora estaba conectada a la plataforma con un cable USB que enviaba la señal a los motores que controlaban el movimiento del laberinto (a través de dos programas).

El segundo módulo (recopilación de datos) consistió en una laptop Hewlett Packard a la que se le conectó el dispositivo USB receptor del *EPOC*TM para registrar los datos transmitidos por el cerebro del sujeto durante la prueba. En este módulo se manejó el panel de control del dispositivo EEG, el software *TestBench* y el software *EmoKey* (programado para enviar datos de texto a un archivo *Word*). De manera adicional se utilizó *OneNote* de *Microsoft* para obtener una imagen de la pantalla. Cada usuario generó cuatro archivos *Word*, cuatro archivos *edf*, y cuatro imágenes de pantalla de la suite *Affectiv*TM.

La Figura 40 muestra el equipo del primer módulo, utilizado por los voluntarios: plataforma movable, laberintos, teclado de computadora e interfaz cerebro-máquina.

Todos los sujetos utilizaron la diadema inalámbrica de *EPOC*TM mientras realizaban las tareas. La batería de la BCI fue cargada a su máxima capacidad el día anterior a la prueba y el material a resolver fue el mismo para todos los voluntarios.



Figura 40. Equipo del primer módulo de trabajo para la interacción del sujeto con el material de prueba.

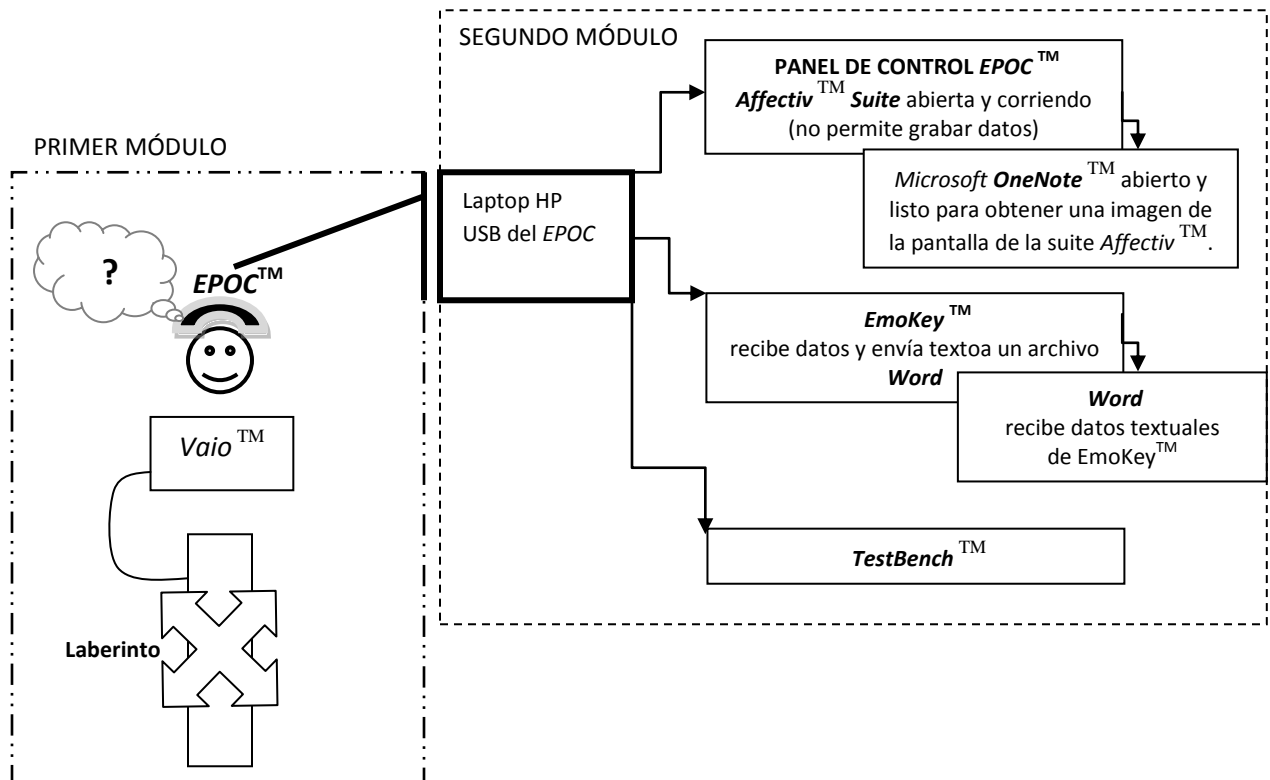


Figura 41. Esquema de transmisiones y registro de datos.

5.2.1 Participantes

Se convocó a voluntarios para participar en el experimento a través de volantes (Figura 42) pegados en algunas paredes de la universidad⁶⁵. Se otorgó una remuneración monetaria a los participantes sin importar si solucionaban completamente las tareas.



Figura 42. Volante de invitación para reunir voluntarios.

La respuesta a la convocatoria fue muy positiva, ya que se presentaron una gran cantidad de voluntarios, pero sólo los diecisiete primeros en llegar fueron aceptados.

Los datos obtenidos por uno de los participantes tuvieron que ser desechados por una falla en la batería de la interfaz. Un total de dieciséis individuos (doce varones y cuatro mujeres) realizaron y completaron los cuatro estados de la prueba.

⁶⁵ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. México D.F.

5.2.2 Herramientas de apoyo

Para poder evaluar las hipótesis de investigación, se diseñaron dos conjuntos de pruebas cognitivas: uno con laberintos sencillos y otro con laberintos de mayor dificultad con la intención de medir los niveles de frustración y entusiasmo experimentados por el usuario ante ambos. Se construyó un mecanismo con un microcontrolador que recibiera órdenes de acción de una computadora.

5.2.2.1 *Arduino*TM: Hardware libre

El hardware libre (*Open Hardware*) es un movimiento análogo al del software libre, en el que “... *se crean y comparten diseños de equipos informáticos, desde chips hasta baterías y programas relacionados con ellos, como los “drivers”...*” (Molist, 2004).

El microcontrolador *Arduino* es “*open-source*”⁶⁶, por lo que el hardware tiene un precio accesible; el software que requiere para su programación es de libre distribución y no requiere un pago por la licencia de uso.

El proyecto *Arduino* se originó en Italia, en el Instituto de Diseño Interactivo Ivrea⁶⁷ en 2005 (Calvo y Alaejos, 2010, 0:55). Es una herramienta para controlar objetos físicos, que permite la creación de dispositivos interactivos autónomos y que también pueden ser conectados a la computadora y controlados a través de diversos lenguajes de programación. Una de las ventajas más atractivas de *Arduino*, además de su sencillez para aprender a controlarla, es que su software es compatible con diferentes sistemas operativos: Windows, Mac OS X, y Linux.

Es posible utilizarla con otros lenguajes de alto nivel como: *ActionScript* (Flash), *AdobeDirector*, *Processing*, *Java*, *C*, *C++*, *C#*, *SuperCollider*, *Matlab*, *VBScript*, *Visual Basic .NET*, *Isadora*⁶⁸, *Ruby*, *Python*, *PureData* entre muchos otros.

⁶⁶ *OpenSource* asegura que cualquiera persona tiene el derecho de usar, modificar y redistribuir el código libremente. Los créditos de los participantes deben respetarse (WebTaller, s.f.).

⁶⁷ Entre los miembros destacados del equipo creador se encuentran Massimo Banzi, David Cuartielles, David Mellis, Tom Igoe y Gianluca Martino (Calvo y Alaejos, 2010).

⁶⁸ *Isadora* (Macintosh y Windows) permite control interactivo sobre medios digitales (audiovisual) en tiempo real (Troikatronix, 2008).

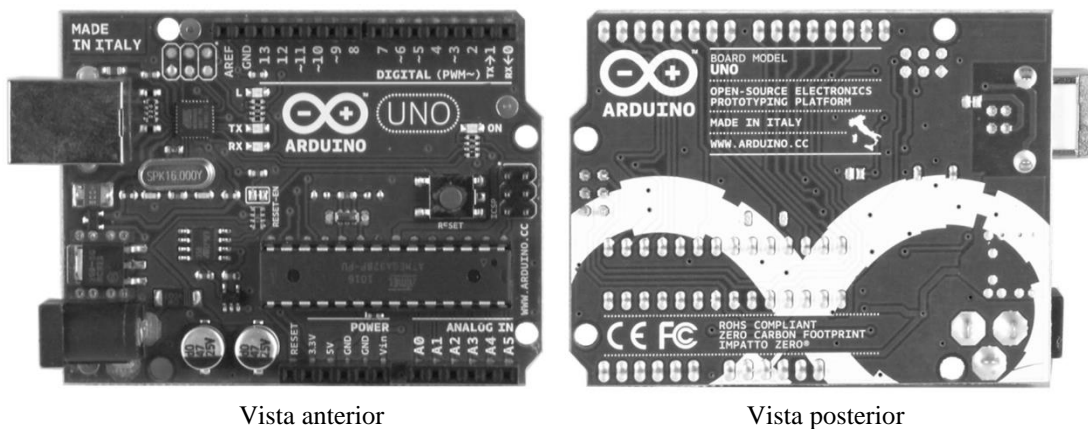
Arduino es una herramienta muy atractiva para artistas, diseñadores interactivos y diseñadores digitales.



Figura 43.- Logotipo del hardware libre *Arduino* y del software libre *Processing*
Imágenes tomadas de <http://arduino.cc/en/> y <http://processing.org/>

5.2.2.2 *Arduino Uno*

Para este proyecto se utilizó el modelo de tarjeta *Arduino Uno*, dos servomotores⁶⁹, un eliminador de alimentación de voltajes variables (3v-12v), una Tablilla de conexión⁷⁰ (*Protoboard* modelo 509-015) y algunos cables para conectar los servomotores a la tarjeta *Arduino* a través de la tablilla de conexión.



Vista anterior

Vista posterior

Figura 44.- Vistas anterior y posterior de la tarjeta *Arduino UNO*.
Imágenes tomada del sitio oficial de *Arduino* <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>

⁶⁹ Es un motor pequeño y poderoso, que no consume mucha energía y que tiene el movimiento controlado por una señal continua de entrada. Mantiene su posición mientras recibe la señal de la línea de entrada, y que puede cambiar de posición en un rango de 180 grados (Universidad de Castilla-La Mancha, s.f.).

⁷⁰ Tablilla de conexión o *Protoboard* Modelo 509-015 de la marca Steren.

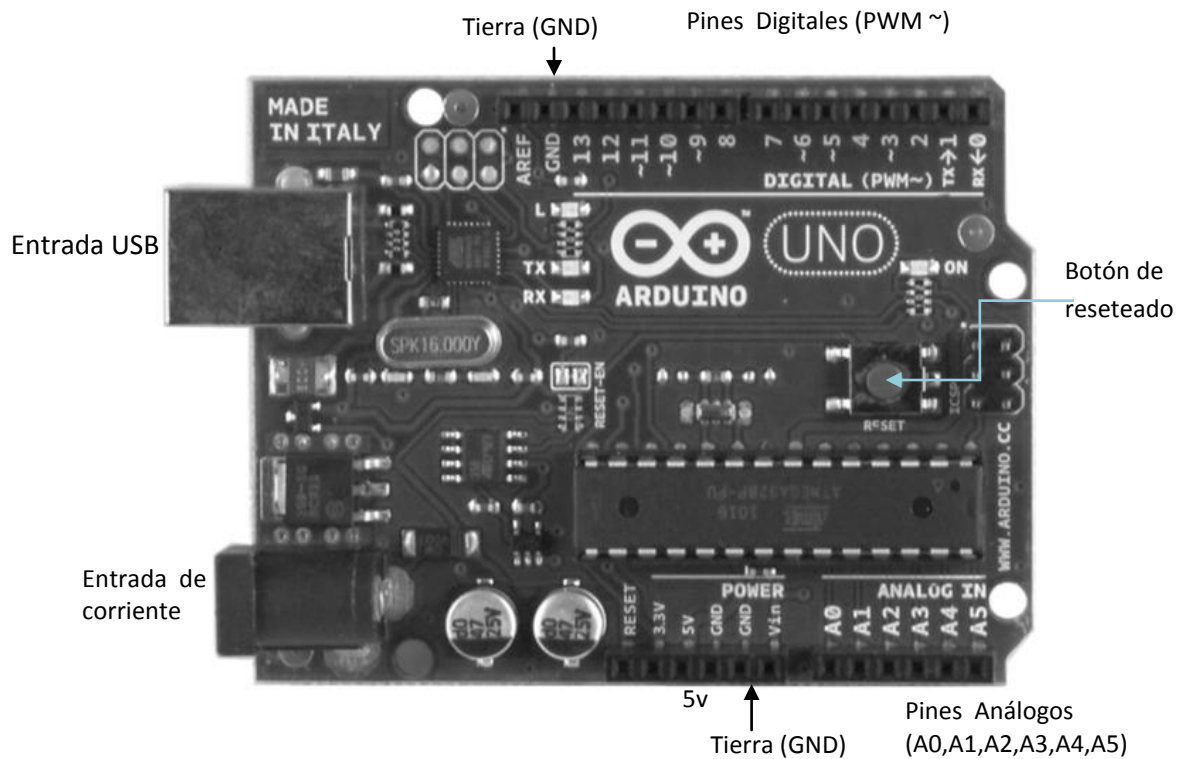


Figura 45. - Las partes de la tarjeta *Arduino UNO*.
 Imagen tomada del sitio oficial de *Arduino* <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>

5.2.2.3 *Processing* y *Arduino*: Software libre

Processing es un lenguaje de programación, gratuito y con licencia de uso libre (código abierto), que incentiva la colaboración y la participación de la comunidad de programadores en la red para su difusión y crecimiento. Comenzó como un apoyo para enseñar a programar en un contexto visual, pero evolucionó rápidamente a una herramienta de programación para proyectos completos. Es un lenguaje orientado a objetos y fue creado por Ben Fry and Casey Reas en 2001 cuando eran estudiantes del *Media Lab* en MIT (*Processing*, s.f.). Al igual que el lenguaje *Arduino*, es sencillo de aprender y es compatible con Windows, Macintosh y Linux. *Arduino* tiene un lenguaje propio de programación de alto nivel basado en la plataforma *Wiring* (diseñada por Hernando Barragán) y en *Processing*. Ambos

lenguajes cuentan con comunidades de desarrolladores que aportan códigos, librerías y herramientas que son de libre acceso.

5.2.3 La prueba: un laberinto

La aplicación diseñada presenta al usuario un escenario interactivo en el que el sujeto desempeña una tarea específica. Mientras el sujeto realiza la actividad, el dispositivo *EPOC™* registra de manera inalámbrica la actividad cognitiva y las emociones del portador en la memoria de una computadora, para su análisis posterior.

La primera idea para este proyecto fue desarrollar una aplicación multimedia interactiva que presentara al usuario un tema específico en la pantalla de la computadora y que permitiera la respuesta al despliegue del contenido por medio del teclado y del *mouse*. El análisis de Ainsworth (2008) en relación a la evaluación de ambientes multimedia nos llevó a cuestionar la pertinencia de diseñar dicha aplicación para el experimento de esta investigación.

Ainsworth (2008) menciona factores que tienen influencia en la manera en que las personas aprenden con aplicaciones multimedia, como son:

- a) Las características individuales del usuario, relacionadas a la capacidad de la memoria de trabajo⁷¹, el conocimiento previo del tema, la integración de las representaciones, los diferentes estilos de aprendizaje y las estrategias que utiliza cada sujeto para asimilar la información.
- b) Factores de diseño relacionados a las representaciones. Más allá de la modalidad o del canal sensorial, existen otros elementos que influyen en la asimilación del contenido, como el nivel de detalle utilizado en las representaciones, la precisión⁷² y especificidad⁷³, la perspectiva y la complejidad⁷⁴.

⁷¹ La capacidad de la memoria de trabajo difiere en las personas de modo que lo que puede generar una sobrecarga cognitiva en unos, puede no generarla en otros (Daily, Lovett, y Reder, 2001 en Ainsworth, 2008, p.3).

⁷² La precisión se refiere al nivel de exactitud de la información (Ainsworth, 2008, p.5).

⁷³ La especificidad se refiere a la adecuación de la representación al fin que se destina, es decir, al grado en que permite expresar abstracción (Ainsworth, 2008, p.5; RAE, 2010).

⁷⁴ La cantidad de información (Ainsworth, 2008, p.5).

- c) Las características de la actividad a desempeñar. Debe tomarse en cuenta el tiempo que el usuario emplea en aprender una interfaz para realizar una tarea específica.

Los factores mencionados pueden influir las variables del experimento. Por ejemplo, el tiempo limitado de las sesiones en los experimentos puede complicar el análisis posterior de los datos, ya que es difícil discernir con claridad entre el tiempo que el sujeto emplea en aprender una interfaz antes de poder realizar una tarea específica y el tiempo que le lleva aprender el contenido para realizarla. Se decidió diseñar una aplicación interactiva que disminuyera dichos factores y que ofreciera al usuario una tarea cognitiva de análisis y visualización ante un escenario simple y otro complejo, cuya interfaz de control fuera lo más sencilla posible.

5.2.3.1 La base móvil del laberinto

Es una plataforma de con una superficie cuadrada suspendida de un eje de manera que puede moverse en cuatro direcciones (adelante, atrás, lado derecho, lado izquierdo). El movimiento lo generan dos servomotores que se contraponen en ejes perpendiculares. El soporte y la base están hechos de *foamboard*.

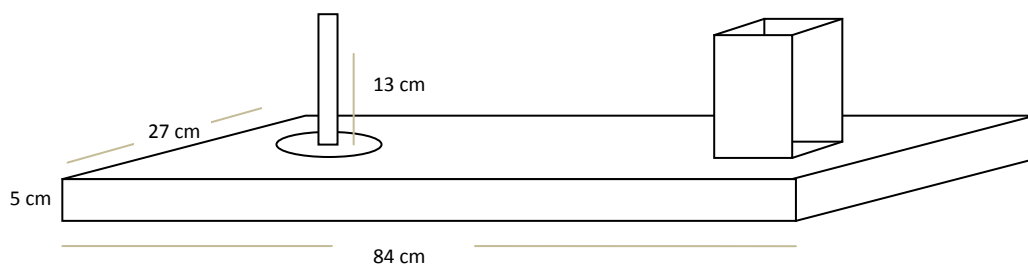


Figura 46. - Esquema y medidas de la plataforma del laberinto

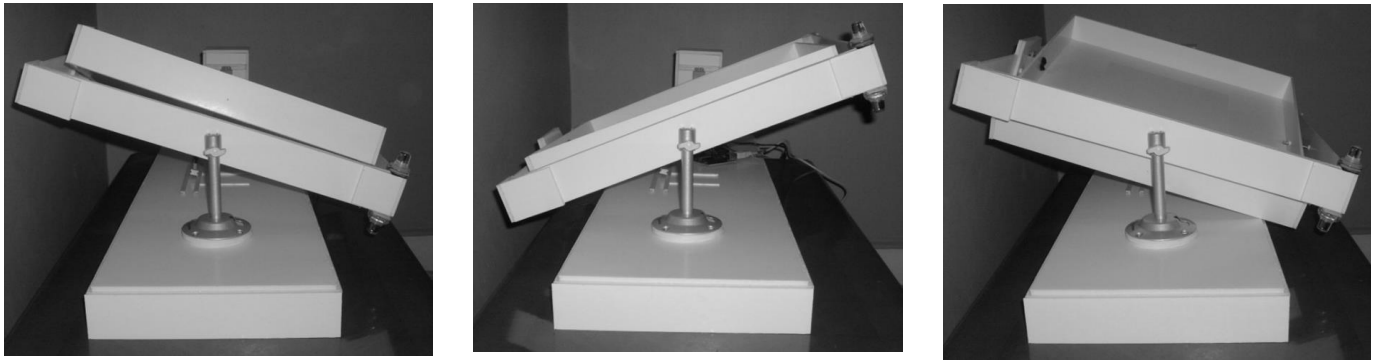


Figura 47. .- Imágenes del movimiento de la base del laberinto

La superficie del plano interno mide 40 cm x 40 cm, y tiene movimiento sobre un solo eje, mientras que el externo mide 47 cm. x 47 cm. y tiene movimiento sobre otro eje, perpendicular al primero. Cada uno de ellos se mueve un grado cada vez que recibe la orden de acción de la computadora; y la máxima inclinación está limitada para evitar dañar la plataforma.

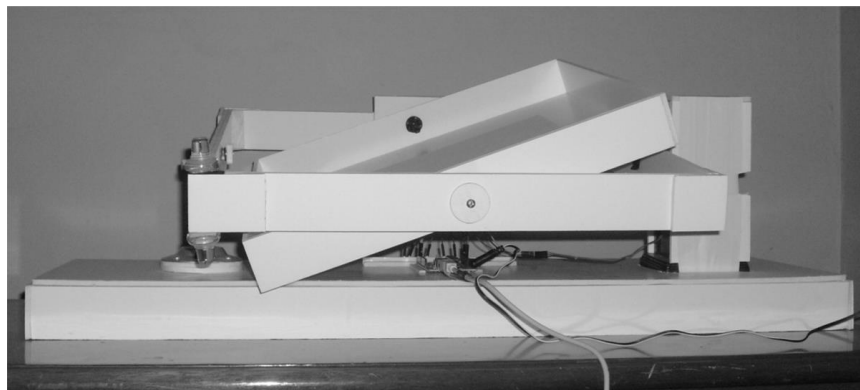


Figura 48. - Imagen de la base del laberinto.

Cada servomotor tiene 3 cables, uno para la tierra (negro), otro para corriente (rojo) y uno más para la transmisión de los datos (amarillo). La tablilla de conexión permite conectar los cables de corriente de los servomotores y utilizar un único cable para conectar los dos motores a la tarjeta *Arduino*. De igual manera permite conectar todos los cables de tierra de los servomotores y usar un solo cable para conectar la tierra de

ambos motores a la tierra de la tarjeta *Arduino*. Los cables con la información proveniente de la computadora (color amarillo) están conectados a los pines digitales 3 y 5 de la tarjeta microcontroladora.

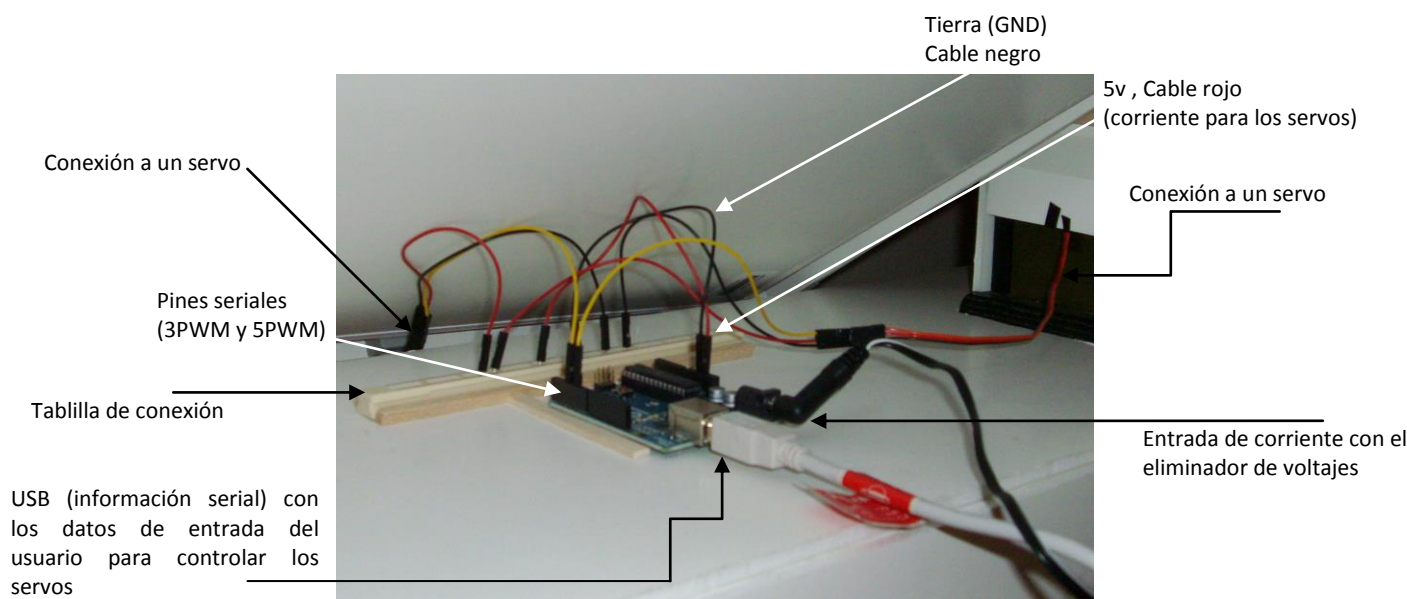


Figura 49. - La conexión de la tarjeta *Arduino* a la tablilla de conexión, los servomotores, la corriente y la computadora.

El programa de control para los servomotores se cargó en la tarjeta *Arduino*, y se ejecuta desde ahí. La computadora se utiliza enviar las órdenes del usuario de manera serial a través del cable USB que conecta el ordenador con el microcontrolador. La corriente utilizada por los servomotores proviene de la computadora a través del cable USB y de eliminador de corriente que se conecta a la toma de energía del lugar. El código del programa para controlar el movimiento del mecanismo se realizó en dos etapas. En la primera (que corresponde a la tarjeta o microcontrolador), el código está escrito en la plataforma *Arduino*. El puerto serial envía los datos que el usuario introduce en el monitor serial de esta plataforma. El monitor serial distingue los caracteres del teclado, pero desafortunadamente no distingue todas las teclas (incluyendo las flechas), por lo que se programó para identificar cuatro letras (QW, OP) y a cada una de ellas se le

asignó un movimiento. QW controlan el plano interno (uno de los servomotores), mientras que OP controla el plano externo (el otro servomotor).

Otra limitante en el monitor serial de *Arduino* es que debe recibir la tecla de *Enter* (o *Send*) después de cada entrada del teclado. El programa en *Arduino* descarta cualquier entrada del teclado que no corresponda a las letras programadas para generar la acción (Q, q, W, w, O, o, P, p). Una vez que se ha cargado el código en la tarjeta *Arduino*, no es necesario tenerlo corriendo en la pantalla, pero sí es necesario tener abierto el monitor serial para poder introducir los datos.

5.2.3.2 El programa en *Arduino*

```
/*Proyecto Maze para el Doctorado en Diseño
*Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco
*Laberinto para controlarse con teclado.
*Plano Interno con teclas Q W
*Plano Externo con teclas O P
*Opción de control serial con BCI Epoc de Emotiv.
*a través de EmoKey e interfaz serial con Processing
*Controllab.pde (para correr en Processing)
*
*Imelda Latapie
*código basado en la librería <Servo.h> de Barragán
*Actualización marzo 27,2011.
*Este programa mueve dos servos (servoA plano Interno, servoB plano
externo)
*para controlar una superficie plana.
*Utiliza la librería servo.h
*/
#include <Servo.h>      //llamamos a la librería

Servo myservoA;        //crea objeto para controlar el servo A
Servo myservoB;        //crea objeto para controlar el servo B

int posA = 80;         //variable para la posición A
int posB = 90;         //variable para la posición A
char letra;            //variable para el caracter de control
int grados = 1;        //movimiento en cada turno
int limitA = 110;       //A el límite máximo de inclinación plano interno
int limitB = 120;       // B el límite máximo de inclinación plano externo
int limitMinA = 50;     //A límite mínimo plano interno
int limitMinB = 60;     //B límite mínimo plano externo
```

```

void setup()
{
  myservoA.attach(3); // asigna el pin 3 PWM al objeto servo A
  myservoB.attach(5); // asigna el pin 5 PWM al objeto servo B

  Serial.begin(9600); //inicia comunicación serial
  Serial.println ("Ready..."); //Aviso para el Serial Monitor
  myservoA.write(posA); //inicializa servo A en posición
  myservoB.write(posB); //inicializa servo B en posición
} // set up

void loop() //loop del programa principal
{
  if (Serial.available()>0) //en caso de haber datos
  {
    letra = Serial.read(); //lee un caracter

    switch(letra){ //acción dependiendo del caracter leído
      case 'W': //Servo A
        if (posA >=limitA) //si llego al límite de su movimiento
          posA = limitA; //mantiene la posición actual
        else { //de otra manera
          posA = posA + grados; //cambia la posición
          myservoA.write(posA); //mueve el servo A
          Serial.flush(); //limpia la información
          delay(10);
          break;
        }//else

      case 'Q': //Servo A (el otro opuesto)
        if (posA <=limitMinA) //si llego al límite de su movimiento
          posA = limitMinA; //mantiene la posición actual
        else { //de otra manera
          posA = posA - grados; //cambia la posición
          myservoA.write (posA); //mueve el servo A
          Serial.flush(); //limpia la información
          delay(10);
          break;
        }//else

      case 'P': //Servo B
        if (posB >=limitB) //si llego al límite de su movimiento
          posB = limitB; //mantiene la posición actual
        else { //de otra manera
          posB = posB + grados; //cambia la posición
          myservoB.write(posB); //mueve el servo B
          Serial.flush(); //limpia la información
          delay(10);
          break;
        }//else

      case 'O': //Servo B (el otro lado)
        if (posB <=limitMinB) //si llego al límite de su movimiento
          posB = limitMinB; //mantiene la posición actual
        else { //de otra manera
          posB = posB - grados; //cambia la posición
          myservoB.write (posB); //mueve el servo
          Serial.flush(); //limpia la información
          delay(10);
          break;
        }//else
    }//switch
  }// if serial available
} // loop principal

```


Encontramos una limitante en este programa: La interfaz del programa, es decir, el teclado resultaba confuso para controlar el laberinto, ya que la vista y atención estaban en el movimiento de los planos del mecanismo y no en el teclado. La selección de las letras apropiadas así como la necesidad de apretar la tecla de *Enter* (o *Return*) era un distractor en la realización de la tarea, por lo que se decidió buscar una solución en la que las teclas correspondientes a las flechas controlaran la aplicación y se eliminara la necesidad de apretar la tecla de *Enter*.



Figura 50. - Interfaz de control inicial para el movimiento del Laberinto. La selección de una de las letras (Q, W, O, P) y la tecla de *Enter* para cada movimiento complicaba la tarea.

Se diseñó un programa en *Processing* que recibe los datos del usuario (con las flechas del teclado o con la interfaz cerebro-máquina) y que envía la información directamente al puerto serial, para ser interpretado por el programa original de *Arduino* cargado en el microcontrolador.

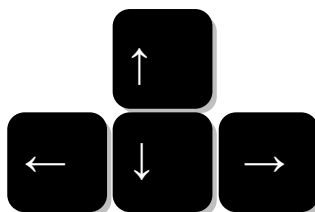


Figura 51. – Opción de interfaz de control para el movimiento del Laberinto con el teclado



Figura 52.- Interfaz de control final para el movimiento del Laberinto.

5.2.3.3 El programa en *Processing*

```

/*Este programa es para controlar la Tarjeta Arduino Uno
 * con un programa cargado para mover un laberinto
 *(Proyecto Maze, de Imelda Latapie, marzo 27 2011,
 * Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco
 * Programa en Arduino con el nombre de MazaEpocArduino
 * Este programa abre una pantalla que recibe la información
 * del teclado y transforma las teclas UP, DOWN, LEFT, RIGHT
 * en información que se transmite de manera serial al la tarjeta Arduino.
 * Es posible utilizarlo con el teclado o con el dispositivo EPOC de Emotiv,
 * a través de la aplicación Emokey.
 * El código de comunicación serial se ha basado en los ejemplos de Tom Igoe.
 * Nota: una vez cargado el programa Arduino MazeEpocArduino.pde en la tarjeta Arduino
 * solo se necesita correr éste programa de Processing
 */
import processing.serial.*;
Serial myPort;    // declaramos el puerto serial

void setupSerial(){
  println(Serial.list()); //nos da la lista de puertos disponibles
  myPort = new Serial(this, "COM8", 9600);
  //COM8 es mi puerto en mi computadora. Este puede variar dependiendo
  //de la máquina.
  //Hay que sustituirlo por el que corresponda al que se conecta a
  //la tarjeta Arduino.
}

void draw() {
  teclado(); //llama al procedimiento teclado()
}

public void teclado(){
  if (keyPressed==true){ //si se ha presionado una tecla
    if (keyCode == UP) { //si la tecla es la flecha UP
      myPort.write("0"); //manda de manera serial la letra 0
      myPort.write(" "); //manda un caracter en blanco
      myPort.clear();    //limpia el puerto
    } //up
  }
}

```

```

if (keyCode == DOWN) { //si la tecla es la flecha DOWN
  myPort.write("P"); //manda de manera serial la letra P
  myPort.write(" "); //manda un caracter en blanco
  myPort.clear(); //limpia el puerto
} //down
if (keyCode == RIGHT) { //si la tecla es la RIGHT
  myPort.write("W"); //manda de manera serial la letra W
  myPort.write(" "); //manda un caracter en blanco
  myPort.clear(); //limpia el puerto
} //right
if (keyCode == LEFT) { //si la tecla es la LEFT
  myPort.write("Q"); //manda de manera serial la letra Q
  myPort.write(" "); //manda un caracter en blanco
  myPort.clear(); //limpia el puerto
} //left
myPort.clear(); //limpianos la lectura
} //keyPressed
} //teclado

void setup() { //programa principal
  size(200,200); //la ventana emergente
  setupSerial(); //la comunicación serial
  draw(); //el procedimiento
}

```

5.2.3.4 Los laberintos

Se diseñaron cuatro laberintos, clasificados en dos grupos: un grupo de dos laberintos rectangulares sencillos y otro grupo de dos laberintos circulares de mayor complejidad que los laberintos rectangulares. Entre los factores de complejidad podemos mencionar el tamaño y color de la bola que se desplazó de un extremo a otro, el peso de la bola, el color del fondo del laberinto, el número de pasadizos y opciones de ruta, así como la superficie de los laberintos. Cada pieza se coloca y se retira con facilidad de la base móvil. La base se queda fija sobre una superficie (una mesa o el suelo).

En la categoría sencilla, que corresponde a los laberintos rectangulares, la bola es blanca y ligera, de unicel (poliestireno expandido) de aproximadamente 2 cm. de diámetro. Debe recorrer de un extremo al otro el laberinto para poder salir de él y dar por realizada la tarea. Esta opción tiene muy pocas opciones de recorrido, la bola es grande y muy visible, los caminos son amplios y la solución es sencilla ya que requiere poco análisis por parte del usuario para completarlo.

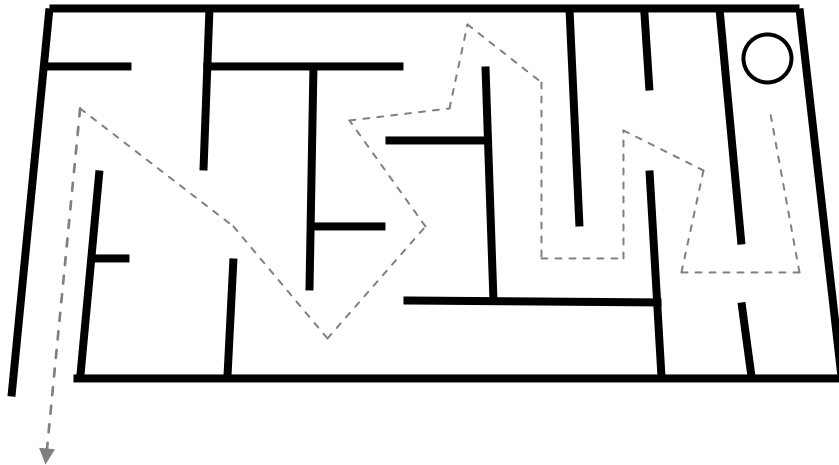


Figura 53. Esquema de uno de los laberintos sencillos.

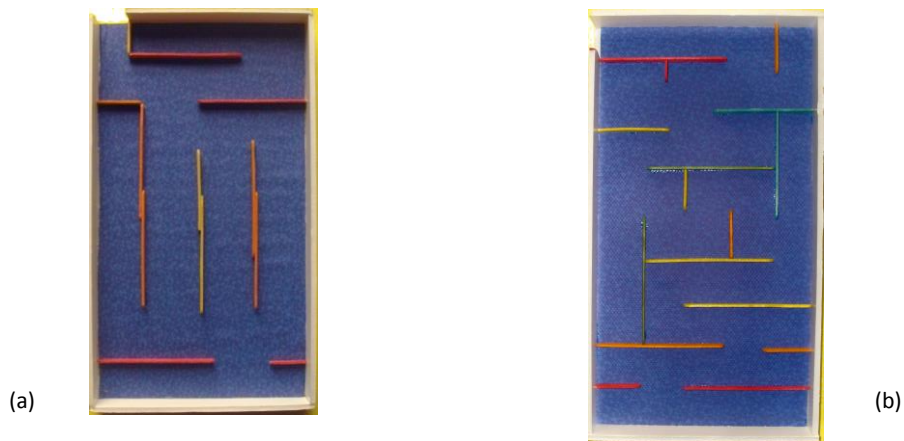


Figura 54. Par de laberintos sencillos. Laberinto A y laberinto B.
El primero (a) muestra un menor grado de dificultad que el segundo (b)

En el escenario complejo, representado por un laberinto circular, la bola es más pequeña (una canica oscura de aproximadamente 8 mm de diámetro), los caminos más angostos y el número de caminos y opciones es mucho mayor, por lo que requiere un control más preciso del movimiento para poder ir del punto de inicio al punto final. El usuario debe además visualizar y resolver el laberinto para poder concluir exitosamente la tarea.

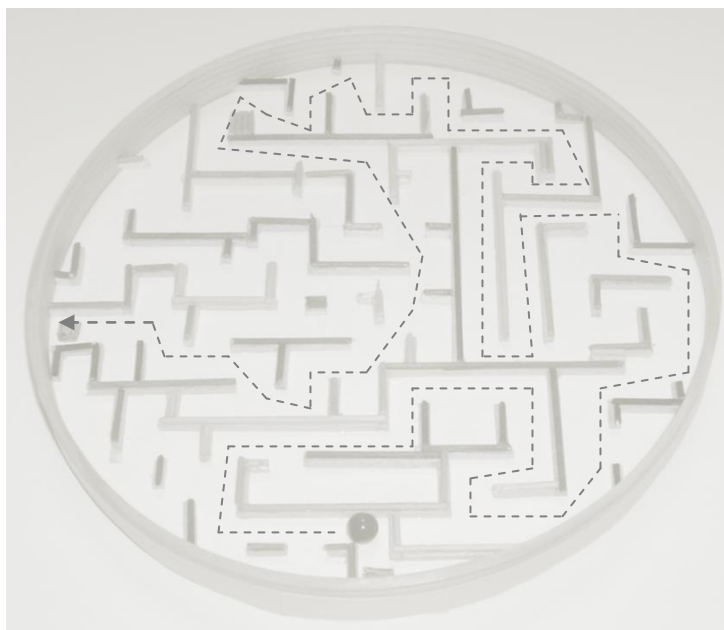


Figura 55. Esquema de uno de los laberintos complejos.



Figura 56. Par de laberintos complejos. Laberinto C y laberinto D.
El primero (a) muestra un menor grado de dificultad que el segundo (b)

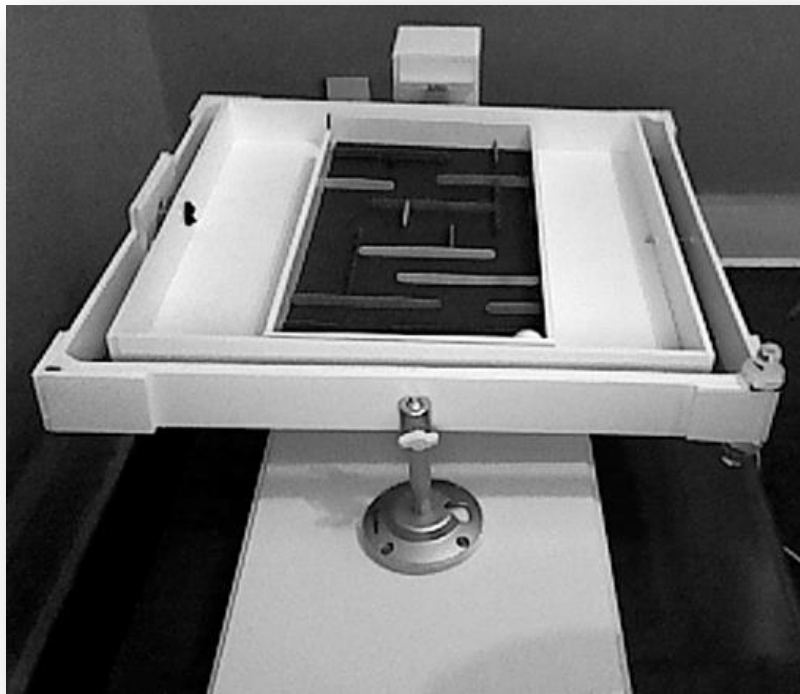


Figura 57. Laberinto funcionando <http://www.youtube.com/watch?v=WiAncIMaFj0>

5.2.4 Instrumentos de medición

En un esfuerzo por registrar la mayor cantidad de información proveniente de las pruebas, se utilizaron tres diferentes instrumentos de medición basados todos ellos en los datos proporcionados por los sensores del dispositivo *EPOCTM*.

- a) la medición de estados emocionales (frustración, entusiasmo instantáneo, entusiasmo de largo plazo y la atención dirigida (*engagement*) a través de la suite *AffectivTM*,
- b) la registro de datos relativos asociados a los estados emocionales (frustración y entusiasmo instantáneo) a través del software *EmoKeyTM*,
- c) la medición de los estados cognitivos y las oscilaciones EEG con el software *TestBenchTM*.

5.2.4.1 Procedimiento

Los voluntarios llenaron un cuestionario con sus datos generales. Recibieron una breve explicación del objetivo del experimento, la tecnología utilizada y lo que se esperaba de ellos. Cada sujeto pasó por un proceso similar:

Se le invitó a tomara asiento frente a la plataforma vacía y se le incentivó a probar el teclado y el efecto que las flechas tenían en el movimiento del mecanismo, mientras se preparaba la BCI, humedeciendo los fieltros⁷⁵ de los sensores. Una vez colocados los fieltros húmedos en el aparato, se colocó el aparato en la cabeza del sujeto, ajustando y acomodando los fieltros húmedos para asegurar una mejor transmisión de la señal. El tiempo utilizado para acomodar el aparato y estar listo para la transmisión fue variable, y dependió en gran medida de la cantidad de cabello de los participantes y el tipo de peinado.

La prueba consistió en resolver cuatro laberintos y el grado de complejidad se incrementó de manera coherente, es decir, se presentó primero el más sencillo de los laberintos y al final la más compleja de las piezas. No hubo límite de tiempo ni presión por parte del grupo investigador para que los estudiantes completaran o resolvieran cada laberinto.

Se solicitó al sujeto que no comenzara la prueba hasta que se le avisara, ya que cada prueba requería preparar los diferentes programas en el módulo de registro de información.

Para dar inicio a cada etapa de la prueba, se inicializó manualmente la grabación de los datos de la siguiente manera:

- Apertura de un archivo de *Word* para guardar los datos enviados por el software *EmoKey*TM
- Apertura de la ventana de la suite *Affectiv*TM
- Inicio del registro de datos en la herramienta *TestBench*TM
- Activación de la programación de *EmoKey*TM (cuya programación permite que el envío de datos a un archivo *Word* previamente seleccionado).

⁷⁵ Se utilizó agua salina comercial (para lentes de contacto) para humedecer los sensores y facilitar la transmisión de datos. Los fieltros para los sensores del dispositivo se fabricaron a partir de los rollitos de algodón que utilizan los dentistas, ya que las piezas originales son de importación.

Una vez completados estos pasos, el sujeto puede iniciar la prueba que consiste en tratar de llevar la bola de un extremo al otro del laberinto a través de los canales o caminos controlando la inclinación del plano base con las flechas del teclado a su disposición.

Al terminar el sujeto la prueba, toda grabación de datos se detiene de manera manual, los archivos son nombrados para su identificación y los datos guardados en el disco duro de la siguiente manera para su posterior interpretación:

- Se desactiva la programación de *Emokey*TM (lo que detiene el envío de texto al archivo *Word*).
- Se detiene la grabación de *TestBench*TM y se guarda el archivo en un folder en el disco duro.
- Se toma una imagen de la pantalla de la suite *Affectiv*TM con el programa *OneNote*TM de *Microsoft*TM.
- Se identifican y guardan los archivos producidos en la sesión.

Este proceso se repite con cada uno de los laberintos. Al final, se retira el *EPOC*TM de la cabeza del usuario, se desechan los fieltros usados (y se colocan nuevos fieltros para el siguiente voluntario).

Se agradece al voluntario su participación y se le entrega el incentivo monetario por su tiempo y trabajo. La sesión completa dura entre 35 y 45 minutos.

Es importante mencionar que en este experimento, *EPOC*TM es utilizado como recolector de datos, aunque es posible programarlo con la aplicación *Emokey*TM para controlar el laberinto sin utilizar el teclado, ya sea a través de las expresiones faciales o de las intenciones y pensamientos. Sin embargo, en esta modalidad se requiere de sesiones de entrenamiento, para el pre registro e identificación de las expresiones, intenciones o pensamientos propios de cada usuario y la asignación programada a los controles de movimiento de la plataforma.

Esta modalidad de control de los laberintos de manera inalámbrica era la intención original del experimento, pero durante las pruebas preliminares enfrentamos el hecho que las contracciones musculares de las expresiones faciales así como los movimientos de posición de la cabeza generan demasiados artefactos en la señal EEG, complicando la posterior interpretación de los resultados. Se deja este método de control para investigaciones posteriores.

5.2.4.2 Administración de datos

Los datos obtenidos fueron guardados en archivos con diferentes formatos. Las siguientes imágenes muestran parte de los datos obtenidos de una sola sesión (en este caso del primer sujeto). Se muestran imágenes de pantalla de la suite *Affectiv*TM y de los laberintos A, B, C y D. La Figura 62 muestra el tipo de archivo (formato *edf*) de la herramienta *TestBench*TM, que registra los 14 sensores de la diadema de manera independiente.

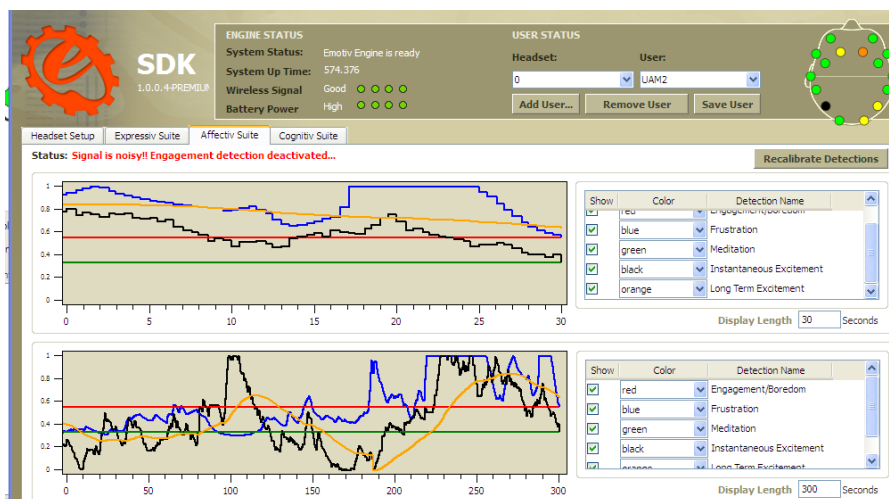


Figura 58. Laberinto Rectangular Sencillo (A). De la suite *Affectiv*TM: La línea azul representa los niveles de frustración, la línea amarilla representa entusiasmo de largo plazo, la línea negra es el entusiasmo instantáneo. La línea roja es el *engagement* (atención dirigida) que debido a la interferencia ambiental la señal está desactivada. La línea verde es la meditación.



Figura 59. Laberinto Rectangular Sencillo (B). De la suite *Affectiv*TM: La línea azul representa los niveles de frustración, la línea amarilla representa entusiasmo de largo plazo, la línea negra es el entusiasmo instantáneo.

instantáneo. La línea roja es el *engagement* (atención dirigida) que debido a la interferencia ambiental la señal está desactivada. La línea verde es la meditación.

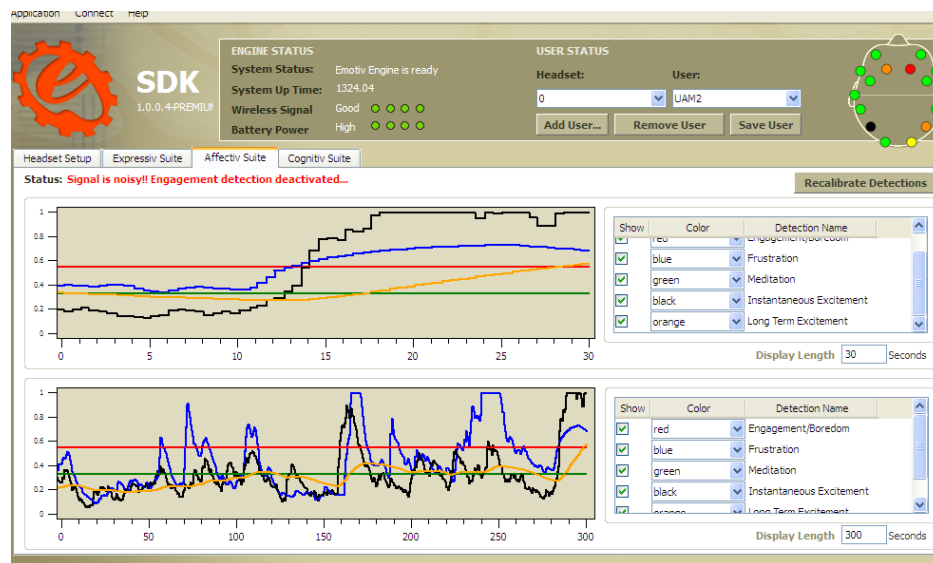


Figura 60. Laberinto Circular Sencillo (C). De la suite *Affectiv*TM, La línea azul representa los niveles de frustración, la línea amarilla representa entusiasmo de largo plazo, la línea negra es el entusiasmo instantáneo. La línea roja es el *engagement* (atención dirigida) que debido a la interferencia ambiental la señal está desactivada. La línea verde es la meditación.

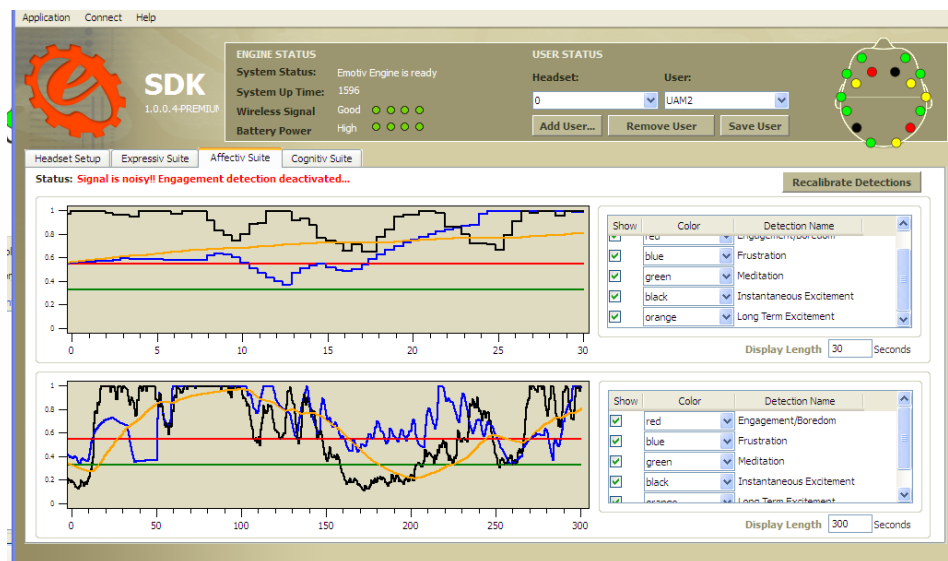


Figura 61. Laberinto Circular Complejo (D). De la suite *Affectiv*TM: La línea azul representa los niveles de frustración, la línea amarilla representa entusiasmo de largo plazo, la línea negra es el entusiasmo instantáneo. La línea roja es el *engagement* (atención dirigida) que debido a la interferencia ambiental la señal está desactivada. La línea verde es la meditación.

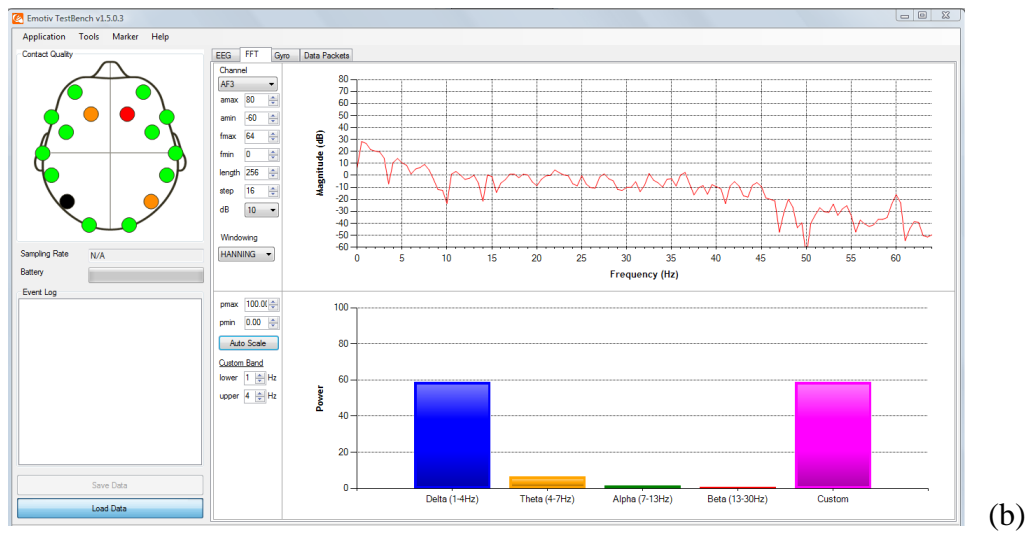
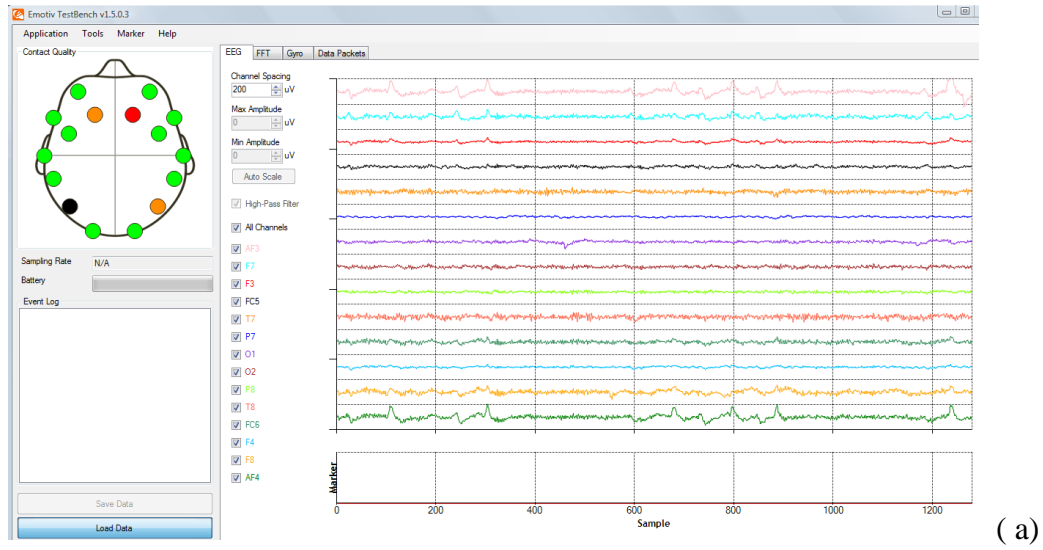


Figura 62. Archivo en formato .edf con los registros de la herramienta *TestBench*TM para uno de los laberintos. a) Información de cada uno de los 14 sensores de la diadema. b) Medición de ondas Delta, Theta, Alfa y Beta, para el mismo momento mostrado en (a).

```

F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0
F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80
ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 F>20
f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20
f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0
F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80
ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50
IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20
IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80
IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50
f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20
f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0
F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80
ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50
IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20
IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80
IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50
f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0
IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80 IE>20 IE>50 IE>80 ie1.0 F>20 f<50 f<80

```

Figura 63. Imagen parcial del Archivo *Word*TM en formato .doc con los registros de la herramienta *EmoKey*TM para uno de los laberintos.

Los datos obtenidos a través de la herramienta *EmoKey*TM resultaron de poca utilidad para representar el grado de variación de respuesta para cada uno de los estados emocionales medidos. Esto se debió a que la herramienta permite la comparación de un estado emocional (una expresión facial o un estado cognitivo) con un grado de intensidad, de manera que si se registra cierto estado para una intensidad mayor o menor a un valor específico, se genera una respuesta del sistema (que en nuestro caso consistió en enviar el dato a un archivo *Word*).

Sin embargo, la herramienta no genera la respuesta ante una igualdad; es decir, no es posible generar el envío del dato si el estado emocional es igual a cierta intensidad. Las variaciones son tan rápidas, que la herramienta responde solamente a los estados de comparación (en donde el tiempo que se mantiene la condición de comparación es un parámetro ajustable). Así, podemos registrar por ejemplo si hay frustración con una intensidad menor a .20 (en una escala de 0 a 1) por un tiempo x, que nosotros definimos. La Figura 64 muestra esta limitación en la programación de la herramienta *EmoKey*TM.

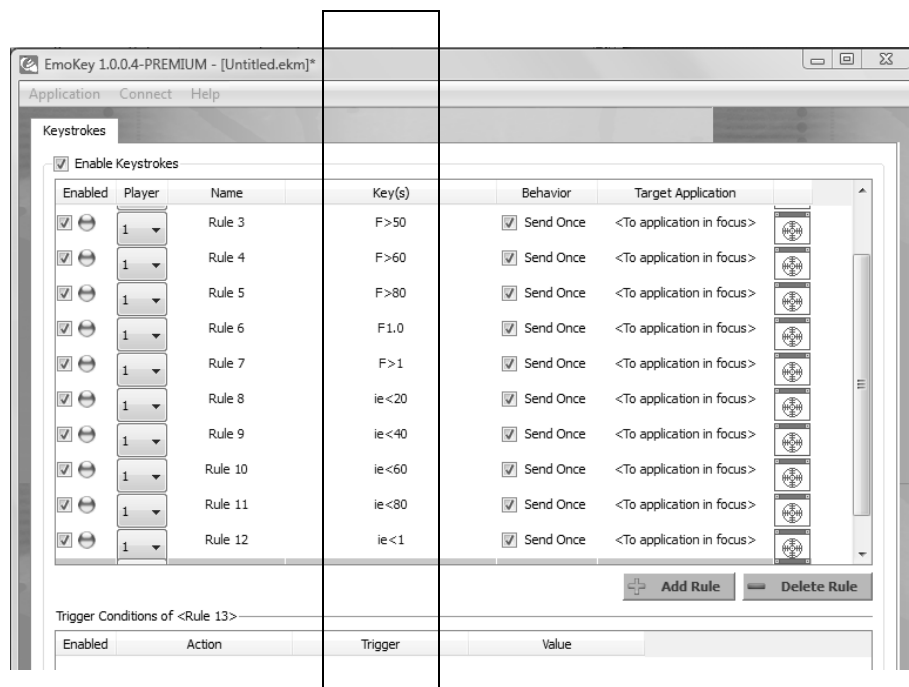


Figura 64. Programación de la herramienta *EmoKey*TM.

Una vez ordenados los datos de estos archivos en grupos, pudimos apreciar que no reflejaban toda la información que deseábamos captar, por lo que decidimos no utilizarlos en el análisis.

Nos concentramos entonces en las imágenes de pantalla obtenidas de la suite *Affectiv*TM y utilizamos una trama para obtener datos cuantitativos de los registros, aprovechando la escala de intensidad que provee la herramienta, y la división en segundos del tiempo de registro.

La Figura 65 muestra la retícula trazada sobre la que se analizaron las gráficas obtenidas. El eje horizontal representa los segundos y se divide de dos en dos, mientras que el eje vertical representa la intensidad del estado emocional en una escala de cero a uno, con incrementos de 0.5.

Sobre ella colocamos cada imagen de pantalla obtenida de la suite *Affectiv*TM, para obtener datos numéricos de tiempo/intensidad de cada línea que representa un estado emocional (Figura 66).

Clasificamos los resultados por laberinto (A, B, C, D) por sujeto (de 1 al 16), con lo que obtuvimos 64 archivos con datos numéricos, cada uno con tres variables (frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo).

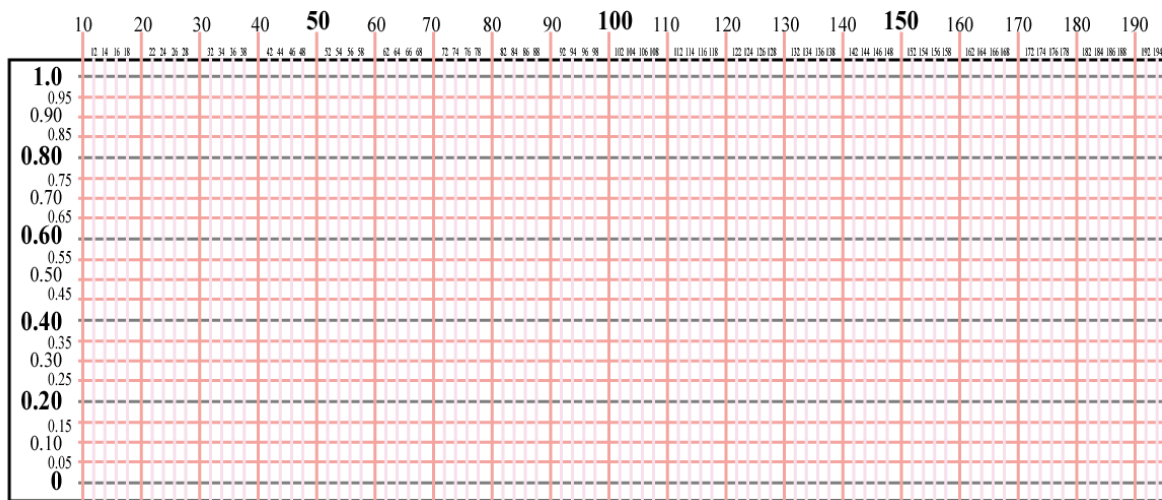


Figura 65. Retícula Segundos vs. Intensidad para obtener datos cuantitativos de las imágenes de los estados emocionales.

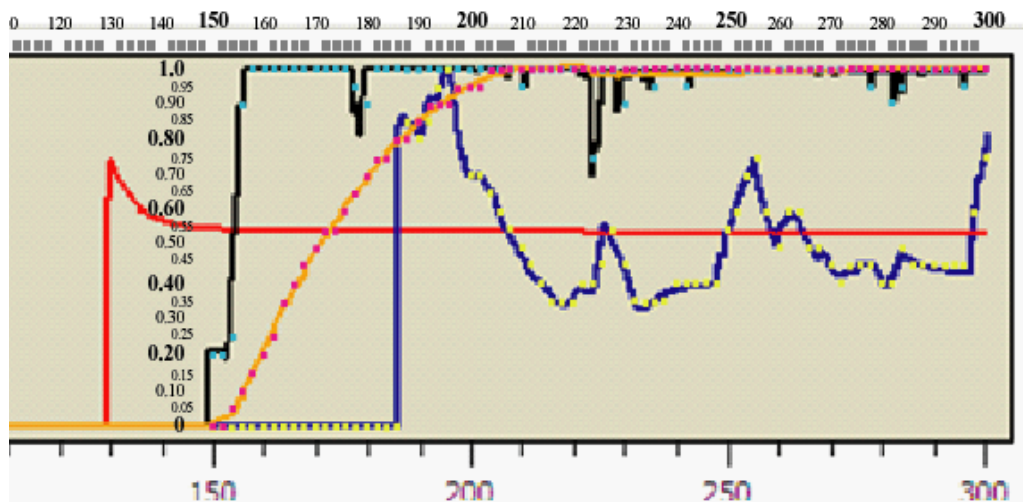


Figura 66. Datos numéricos de tiempo/intensidad de tres estados emocionales (frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo).

El Anexo A incluye las imágenes de todas las gráficas de los estados emocionales recolectadas.

5.3 Los datos y las pruebas estadísticas

Utilizamos una gradación con unidades enteras para la escala de intensidad con un rango de 0 a 100 unidades. El trabajo estadístico para obtener la media de los datos obtenidos por cada participante en cada uno de los laberintos se presenta en las siguientes tablas.

La primera columna muestra el orden de los participantes y la segunda el tiempo que tomó a cada uno resolver el laberinto. Las demás columnas muestran las medias de la frustración, el entusiasmo instantáneo y el entusiasmo de largo plazo respectivamente.

Tabla 8.- Tiempo y Media Aritmética de los estados emocionales de cada sujeto al resolver el laberinto A.

	Tiempo	Frustración	Entusiasmo instantáneo	Entusiasmo de largo plazo
participante	A seg.	Af	Aie	ALte
1	176	39.61	95.59	84.21
2	95	82.6	64.14	51.35
3	30	73.44	44.69	18.75
4	14	48.75	69.38	64.38
5	24	98.46	48.46	41.15
6	12	100	77.86	97.14
7	18	98.5	48.5	65
8	30	100	37.5	68.75
9	22	60.83	46.67	22.08
10	16	100	95.56	95
11	16	97.78	36.11	22.22
12	24	17.69	30.77	26.92
13	12	57.14	27.86	72.14
14	16	78.89	81.11	85
15	10	35.56	60.56	78.89
16	10	59.17	67.5	67.5

Tabla 9.- Tiempo y Media Aritmética de los estados emocionales de cada sujeto al resolver el laberinto B.

	Tiempo	Frustración	Entusiasmo instantáneo	Entusiasmo de largo plazo
participante	B seg.	Bf	Bie	BLte
1	206	100	57.53	57.01
2	126	66.19	49.76	39.29
3	92	32.23	79.15	81.38
4	168	50.12	22.53	23
5	130	46.74	26.06	26.89
6	76	61.03	32.56	39.74
7	214	84.86	26.85	27.45
8	70	100	17.5	18.19
9	386	37.75	54.21	59.07
10	110	40.62	44.82	43.48
11	44	100	82.83	51.74
12	44	24.13	14.57	29.13
13	62	41.38	22.5	24.22
14	50	82.88	68.27	82.5
15	116	44.32	43.05	37.71
16	58	36.5	9.167	30.5

Tabla 10.- Tiempo y Media Aritmética de los estados emocionales de cada sujeto al resolver el laberinto C.

	Tiempo	Frustración	Entusiasmo instantáneo	Entusiasmo de largo plazo
participante	C seg.	Cf	Cie	CLte
1	215	54.1	51.29	52.87
2	108	58.73	36.45	36.82
3	110	66.96	54.73	42.95
4	122	39.03	18.06	26.05
5	616	32.93	34.08	32.11
6	112	58.68	29.74	38.16
7	118	60.57	26.64	36.56
8	194	100	63.98	60.2
9	362	34.6	39.9	36.72
10	46	46.04	42.29	58.96
11	96	100	81.43	69.39
12	96	28.9	17.55	21.43
13	340	41.19	57.98	57.58
14	60	48.06	27.9	35.48
15	218	38.95	50.5	49.86
16	94	38.95	50.5	49.86

Tabla 11.- Tiempo y Media Aritmética de los estados emocionales de cada sujeto al resolver el laberinto D.

	Tiempo	Frustración	Entusiasmo instantáneo	Entusiasmo de largo plazo
participante	D seg.	Df	Die	DLte
1	104	62.22	49.2	36.75
2	154	77.69	61.28	70.19
3	100	43.33	70.39	67.06
4	184	53.98	35.7	36.18
5	76	51.41	39.87	27.82
6	102	56.76	61.37	65.59
7	130	70.23	24.47	30.83
8	208	100	45.95	46.67
9	152	41.36	24.81	34.48
10	290	61.1	67.23	69.97
11	194	79.39	51.22	52.76
12	128	34.31	20.92	26
13	82	42.5	24.64	38.1
14	70	34.58	7.194	14.17
15	120	38.85	48.03	46.07
16	134	51.25	12.21	19.34

Utilizamos la plataforma R⁷⁶ para analizar y graficar los datos. R es un software gratuito orientado al análisis estadístico de datos que proporciona un entorno gráfico de trabajo de fácil manipulación.

Asignamos los datos correspondientes a cada estado emocional de cada laberinto presentados previamente en las tablas a vectores numéricos para poder trabajar con el software R.

Frustración

Af<- c (39.61, 82.6, 73.44, 48.75, 98.46, 100, 98.5, 100, 60.83, 100, 97.78, 17.69, 57.14, 78.89, 35.56, 59.17)
Bf<-c (100, 66.19, 32.23, 50.12, 46.74, 61.03, 84.86, 100, 37.75, 40.62, 100, 24.13, 41.38, 82.88, 44.32, 36.5)
Cf<-c (54.1, 58.73, 66.96, 39.03, 32.93, 58.68, 60.57, 100, 34.6, 46.04, 100, 28.9, 41.19, 48.06, 38.95, 38.95)
Df<-c (62.22, 77.69, 43.33, 53.98, 51.41, 56.76, 70.23, 100, 41.36, 61.1, 79.39, 34.31, 42.5, 34.58, 38.85, 51.25)

Entusiasmo instantáneo

Aie<-c (95.59, 64.14, 44.69, 69.38, 48.46, 77.86, 48.5, 37.5, 46.67, 95.56, 36.11, 30.77, 27.86, 81.11, 60.56, 67.5)

⁷⁶ R puede ser descargado desde el sitio <http://www.r-project.org/>

```
Bie<-c(57.53,49.76,79.15,22.53,26.06,32.56,26.85,17.5,54.21,44.82,82.83,14.57,22.5,68.27,43.05, 9.167)
Cie<-c(51.29,36.45,54.73,18.06,34.08,29.74,26.64,63.98,39.9,42.29,81.43,17.55,57.98,27.9,50.5, 50.5)
Die<-c(49.2, 61.28, 70.39, 35.7, 39.87, 61.37, 24.47, 45.95, 24.81, 67.23, 51.22, 20.92, 24.64, 7.194, 48.03,
12.21)
```

Entusiasmo de largo plazo

```
ALt<-c(84.21, 51.35, 18.75, 64.38, 41.15, 97.14, 65, 68.75, 22.08, 95, 22.22, 26.92, 72.14, 85, 78.89, 67.5)
BLt<-c(57.01,39.29,81.38,23,26.89,39.74,27.45,18.19,59.07,43.48,51.74,29.13,24.22,82.5,37.71, 30.5)
CLt<-c(52.87,36.82,42.95,26.05,32.11,38.16,36.56,60.2,36.72,58.96,69.39,21.43,57.58,35.48,49.86, 49.86)
DLt<-c(36.75, 70.19, 67.06, 36.18, 27.82, 65.59, 30.83, 46.67, 34.48, 69.97, 52.76, 26, 38.1, 14.17, 46.07,
19.34)
```

El resumen de estadísticas de los datos se presenta en la Figura 67, que muestra el valor mínimo, máximo, la media aritmética (*mean*), la mediana (percentil 0.5) y los percentiles 0.25 y 0.75 de la distribución (primer y tercer cuartiles).

```
> summary(dep.1)
```

Af		Bf		Cf		Df	
Min.	: 17.69	Min.	: 24.13	Min.	: 28.90	Min.	: 34.31
1st Qu.:	55.04	1st Qu.:	39.90	1st Qu.:	38.95	1st Qu.:	42.22
Median :	76.17	Median :	48.43	Median :	47.05	Median :	52.70
Mean :	71.78	Mean :	59.30	Mean :	52.98	Mean :	56.19
3rd Qu.:	98.47	3rd Qu.:	83.38	3rd Qu.:	59.19	3rd Qu.:	64.22
Max. :	100.00	Max. :	100.00	Max. :	100.00	Max. :	100.00
Aie		Bie		Cie		Die	
Min.	:27.86	Min.	: 9.167	Min.	:17.55	Min.	: 7.194
1st Qu.:	42.89	1st Qu.:	22.523	1st Qu.:	29.28	1st Qu.:	24.598
Median :	54.53	Median :	37.805	Median :	41.09	Median :	42.910
Mean :	58.27	Mean :	40.710	Mean :	42.69	Mean :	40.280
3rd Qu.:	71.50	3rd Qu.:	55.040	3rd Qu.:	52.15	3rd Qu.:	53.735
Max. :	95.59	Max. :	82.830	Max. :	81.43	Max. :	70.390
ALte		BLte		CLte		DLte	
Min.	:18.75	Min.	:18.19	Min.	:21.43	Min.	:14.17
1st Qu.:	37.59	1st Qu.:	27.31	1st Qu.:	36.29	1st Qu.:	30.08
Median :	66.25	Median :	38.50	Median :	40.55	Median :	37.42
Mean :	60.03	Mean :	41.96	Mean :	44.06	Mean :	42.62
3rd Qu.:	80.22	3rd Qu.:	53.06	3rd Qu.:	54.05	3rd Qu.:	55.97
Max. :	97.14	Max. :	82.50	Max. :	69.39	Max. :	70.19

Figura 67. Análisis estadístico de los datos en R.

Con estas cifras creamos los diagramas de caja para comparar la distribución por variable de las mediciones de cada laberinto.

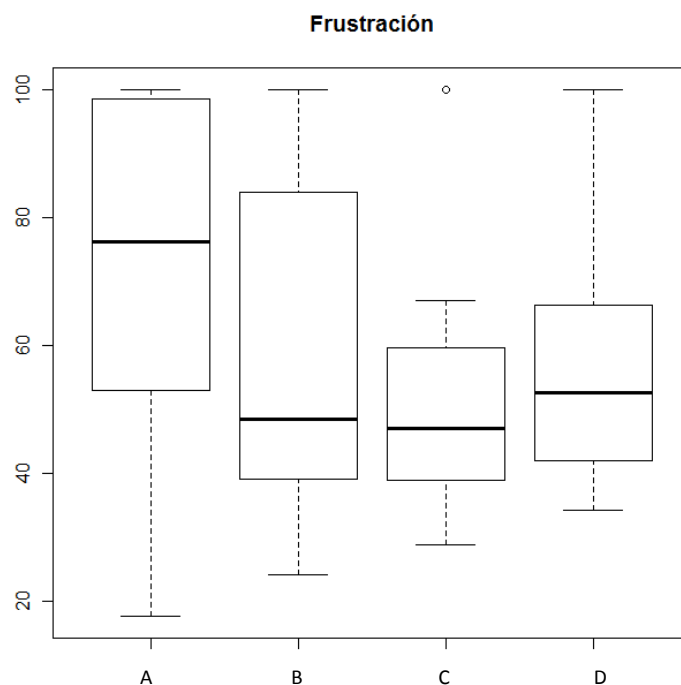


Figura 68. Diagramas de caja de cada laberinto para la variable frustración.

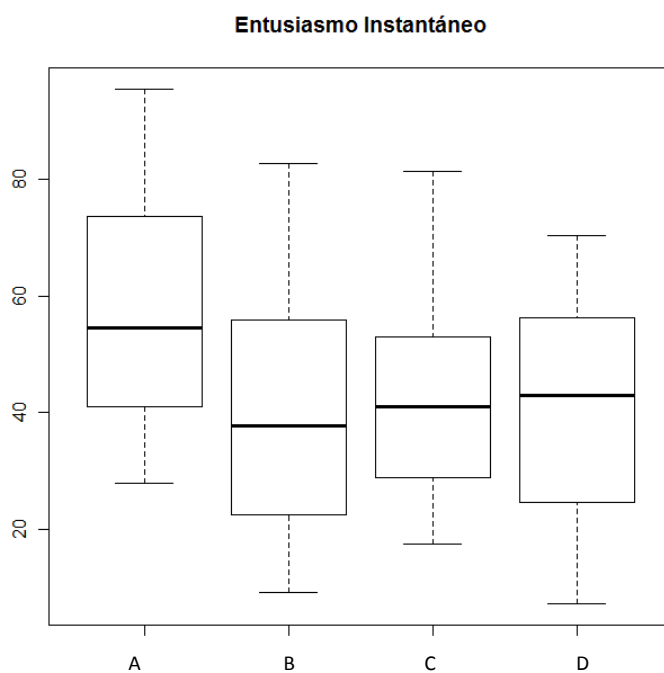


Figura 69. Diagramas de caja de cada laberinto para la variable entusiasmo instantáneo.

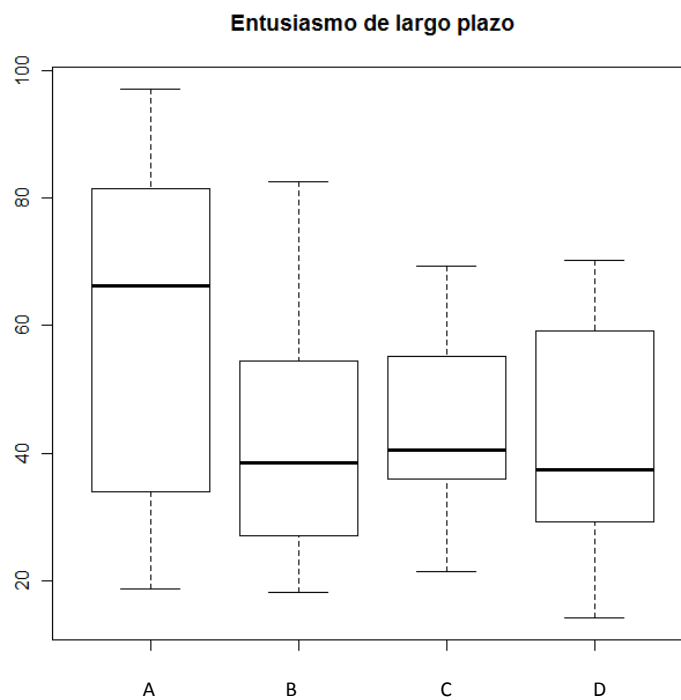


Figura 70. Diagramas de caja de cada laberinto para la variable entusiasmo de largo plazo.

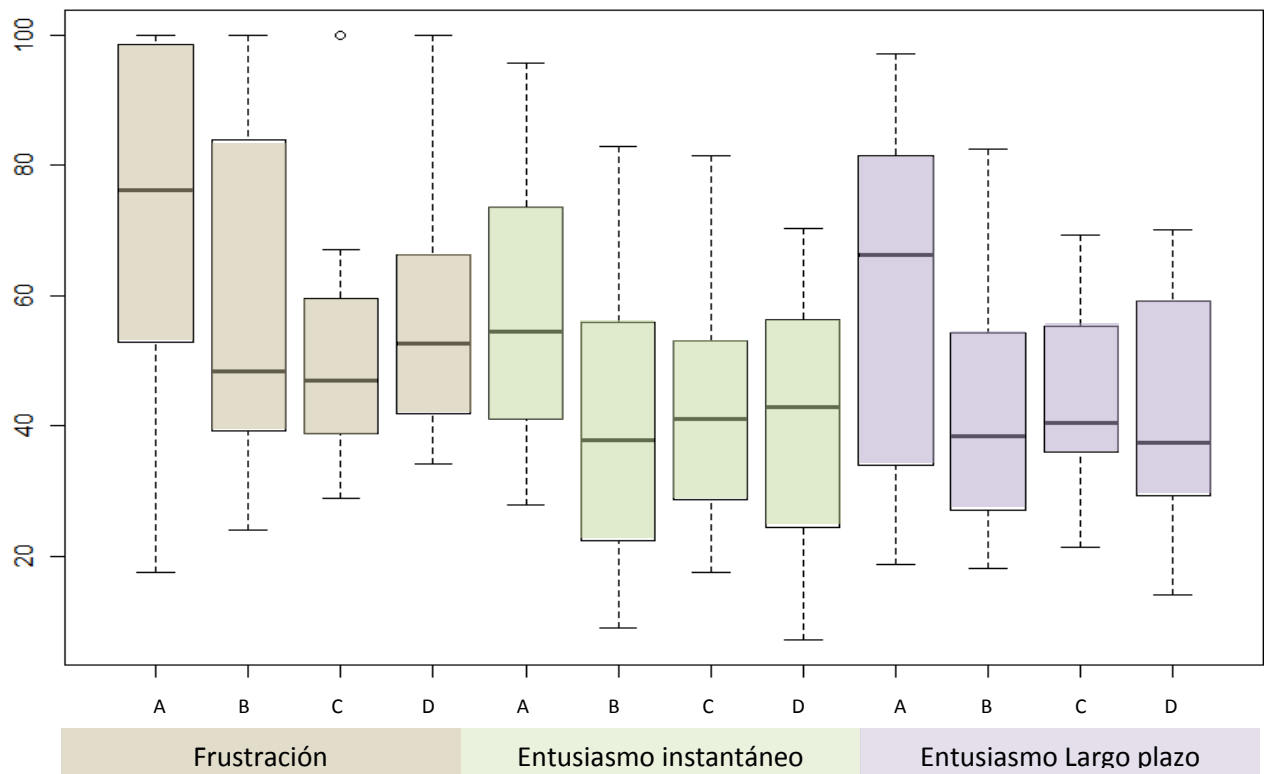


Figura 71. Diagramas de caja de cada laberinto y de cada variable.

Los diagramas de caja nos permiten comparar la distribución de los datos en cada categoría de manera visual. La distribución es simétrica si la línea de la mediana en el rectángulo de la caja se encuentra a la mitad.

Para la variable frustración (Figura 68) observamos en el laberinto C una medida atípica, por encima del límite superior que se aleja del resto de los datos y podemos apreciar que el valor mínimo de frustración en todas las pruebas se fue incrementando de manera lineal según se incrementaba la complejidad de la prueba. Los valores mínimos registrados cambiaron de 17.69 para el primer laberinto a 24.13 para el Laberinto B, a 28.90 en la tercera prueba hasta llegar a 34.31 en el laberinto D. Las dos primeras pruebas (A, B) muestran una mayor dispersión en la distribución de los datos, mientras que los últimos dos laberintos (C, D) que corresponden a las pruebas más complejas muestran una menor dispersión en la distribución. Para las pruebas B, C y D las medias son mayores que las medianas, lo que indica una asimetría positiva o sesgada a la derecha.

Utilizamos los cuartiles para verificar si se cumplía la condición de una asimetría positiva, en la que $Q_3 - Q_2 > Q_2 - Q_1$ o la condición de una asimetría negativa $Q_3 - Q_2 < Q_2 - Q_1$ (Sarabia, Pascual, 2007, p.71).

En la asimetría positiva (que está sesgada a la derecha) las mediciones están más concentradas en los menores puntajes de la escala, y las mediciones con puntajes mayores al segundo cuartil (mediana) son más heterogéneas y están más dispersas. La asimetría negativa (sesgada a la izquierda) los datos tienden a concentrarse hacia los mayores puntajes, mientras que las mediciones de puntajes más bajos son más heterogéneas se dispersan más.

Frustración Prueba A

$Q_3 - Q_2 = 98.47 - 76.17 = 22.3$ y $Q_2 - Q_1 = 98.47 - 55.04 = 43.43$ En donde $22.3 < 43.43$ Cumple con la condición de Asimetría negativa (sesgada a la izquierda).

Frustración Prueba B

$Q_3 - Q_2 = 83.38 - 48.43 = 34.95$ y $Q_2 - Q_1 = 48.43 - 39.90 = 8.53$ En donde $34.95 > 8.53$ Cumple con la condición de Asimetría positiva (sesgada a la derecha).

Frustración Prueba C

$Q_3 - Q_2 = 59.19 - 47.05 = 12.14$ y $Q_2 - Q_1 = 47.05 - 38.95 = 8.1$ En donde $12.14 > 8.1$ Cumple con la condición de Asimetría positiva (sesgada a la derecha).

Frustración Prueba D

$Q_3 - Q_2 = 64.22 - 52.70 = 11.52$ y $Q_2 - Q_1 = 52.701 - 42.22 = 10.48$ En donde

$11.52 > 10.48$ Cumple con la condición de Asimetría positiva (sesgada a la derecha).

Para la variable que representa al entusiasmo instantáneo (Figura 69) volvemos a observar que la primera prueba arroja datos más apartados a los que las otras tres pruebas (B, C, D) obtuvieron.

Entusiasmo instantáneo Prueba A

$Q_3 - Q_2 = 71.50 - 54.53 = 16.97$ y $Q_2 - Q_1 = 54.53 - 42.89 = 11.64$ En donde

$16.97 > 11.64$ Cumple con la condición de Asimetría positiva (sesgada a la derecha).

Entusiasmo instantáneo Prueba B

$Q_3 - Q_2 = 55.04 - 37.80 = 17.24$ y $Q_2 - Q_1 = 37.80 - 22.52 = 15.28$ En donde

$17.24 > 15.28$ Cumple con la condición de Asimetría positiva (sesgada a la derecha).

Entusiasmo instantáneo Prueba C

$Q_3 - Q_2 = 52.15 - 41.09 = 11.06$ y $Q_2 - Q_1 = 41.09 - 29.28 = 11.81$ En donde

$11.06 < 11.81$ Cumple con la condición de Asimetría negativa (sesgada a la izquierda).

Entusiasmo instantáneo Prueba D

$Q_3 - Q_2 = 53.73 - 42.91 = 10.82$ y $Q_2 - Q_1 = 42.91 - 24.59 = 18.32$ En donde

$10.82 < 18.32$ Cumple con la condición de Asimetría negativa (sesgada a la izquierda)

La variable Entusiasmo de largo plazo (Figura 70) muestra una primera prueba (laberinto A) con mediciones muy diferentes de los otros tres laberintos más complejos.

Entusiasmo de largo plazo Prueba A

$Q_3 - Q_2 = 80.22 - 66.25 = 13.97$ y $Q_2 - Q_1 = 66.25 - 37.59 = 28.66$ En donde

$13.97 < 28.66$ Cumple con la condición de Asimetría negativa (sesgada a la izquierda)

Entusiasmo de largo plazo Prueba B

$Q_3 - Q_2 = 53.06 - 38.50 = 14.56$ y $Q_2 - Q_1 = 38.50 - 27.31 = 11.19$ En donde

$14.56 > 11.19$ Cumple con la condición de Asimetría positiva (sesgada a la derecha).

Entusiasmo de largo plazo Prueba C

$Q_3 - Q_2 = 54.05 - 40.55 = 13.5$ y $Q_2 - Q_1 = 40.55 - 36.29 = 4.26$ En donde

$13.5 > 4.26$ Cumple con la condición de Asimetría positiva (sesgada a la derecha).

Entusiasmo de largo plazo Prueba D

$Q_3 - Q_2 = 55.97 - 37.42 = 18.55$ y $Q_2 - Q_1 = 37.42 - 30.08 = 7.34$ En donde

$18.55 > 7.34$ Cumple con la condición de Asimetría positiva (sesgada a la derecha).

Observamos que el Laberinto A generó en los sujetos altos niveles de frustración y niveles de entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo alejados de los otros tres laberintos que eran más difíciles de solucionar. Esto puede deberse a que el Laberinto A es la primera tarea que el usuario enfrenta controlando la plataforma móvil bajo la presión de solucionar el problema y llevar la pelota al extremo final del laberinto. En el resto de las pruebas, las mediciones obtenidas son más cercanas entre sí y menos extremas. Si comparamos los datos de las pruebas B y D, correspondientes al laberinto más complejo de cada grupo de pruebas (en donde el laberinto B es rectangular y el laberinto D es circular) obtenemos la Figura 72.

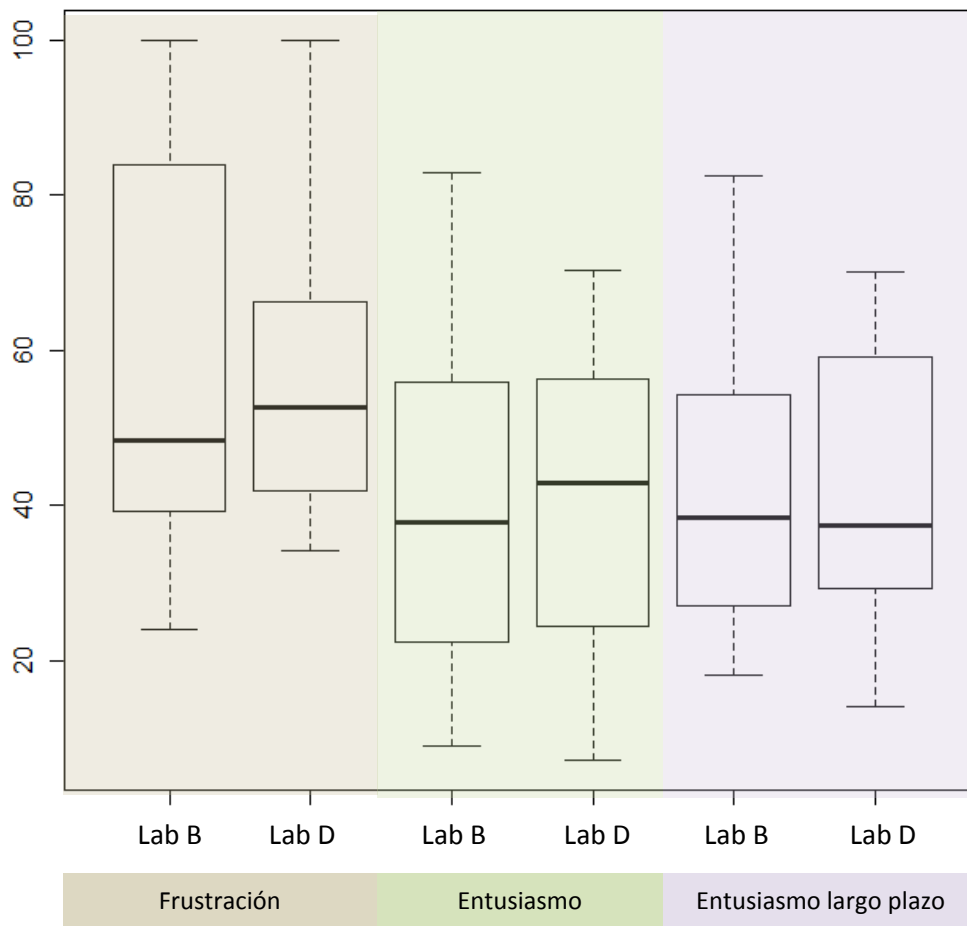


Figura 72. Las variables dependientes de las pruebas B y D.

Considerando que los datos obtenidos en la prueba A pueden tener un factor de influencia adicional, como lo sería el esfuerzo del usuario al aprender a manejar la plataforma móvil y controlar el movimiento de la bola en la superficie del laberinto, seleccionamos las prueba B y D por representar los grados de complejidad más alejados entre sí. Se observa que el grupo de mediciones correspondiente al más sencillo presenta niveles menores de frustración, menor puntuación en el entusiasmo instantáneo y una diferencia poco perceptible (de 1.08 puntos) en el entusiasmo de largo plazo.

Confrontamos entonces los datos de las pruebas C y D, es decir, nivel intermedio de complejidad con el de mayor dificultad (Figura 73).

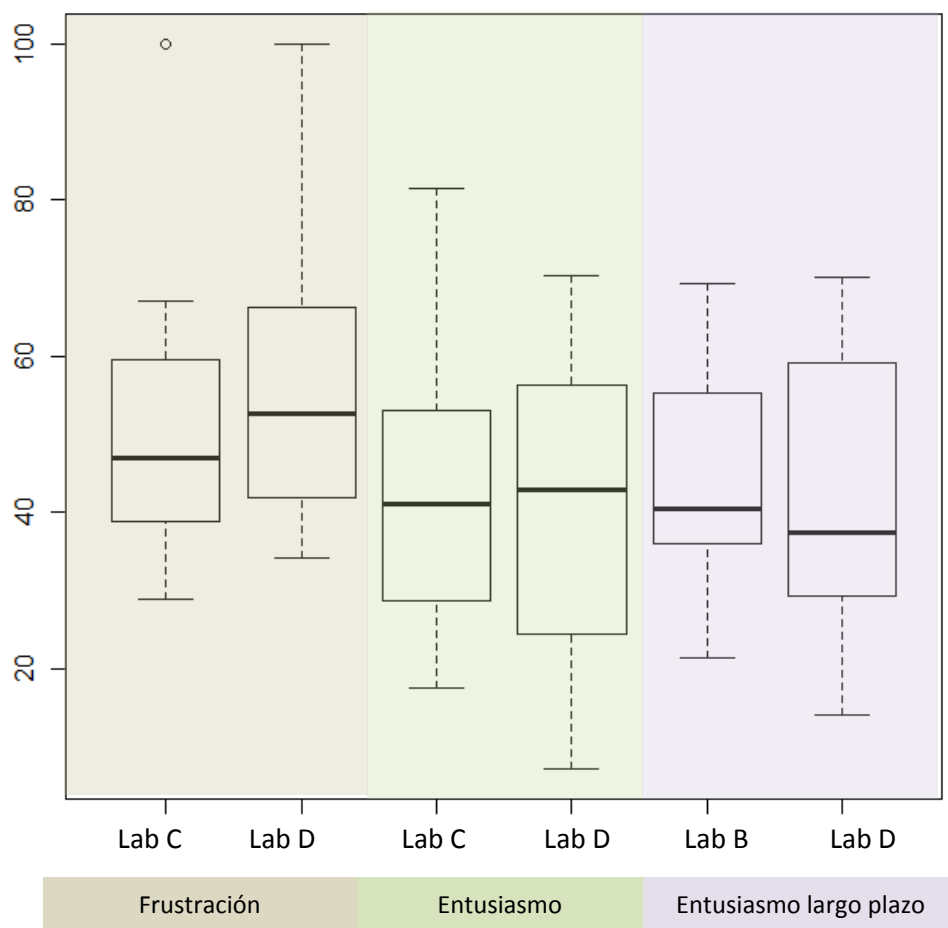


Figura 73. Las variables dependientes de las pruebas C y D.

La gráfica y los datos muestran que las mediciones de frustración y entusiasmo instantáneo de la prueba D (nivel de complejidad más alto) son más altas que las mediciones de frustración y entusiasmo instantáneo del nivel intermedio de complejidad. Sin embargo en esta comparación notamos que los niveles de entusiasmo de largo plazo de la prueba C muestran una diferencia de 3.13 puntos con respecto a los del laberinto más complejo.

Esto podría sugerir un aumento en la frustración y el entusiasmo instantáneo al incrementar la complejidad de la tarea. En cuanto al entusiasmo de largo plazo, no queda clara la posibilidad de una tendencia de las mediciones al variar la complejidad.

Con los datos que tenemos, agrupamos las mediciones por variable, y analizamos cada hipótesis.

Tabla 12.- Mediciones agrupadas por variable.

Frustración:

Af	Bf	Cf	Df
39.61	100	54.1	62.22
82.6	66.19	58.73	77.69
73.44	32.23	66.96	43.33
48.75	50.12	39.03	53.98
98.46	46.74	32.93	51.41
100	61.03	58.68	56.76
98.5	84.86	60.57	70.23
100	100	100	100
60.83	37.75	34.6	41.36
100	40.62	46.04	61.1
97.78	100	100	79.39
17.69	24.13	28.9	34.31
57.14	41.38	41.19	42.5
78.89	82.88	48.06	34.58
35.56	44.32	38.95	38.85
59.17	36.5	38.95	51.25

Entusiasmo instantáneo

Aie	Bie	Cie	Die
95.59	57.53	51.29	49.2
64.14	49.76	36.45	61.28
44.69	79.15	54.73	70.39
69.38	22.53	18.06	35.7
48.46	26.06	34.08	39.87
77.86	32.56	29.74	61.37
48.5	26.85	26.64	24.47
37.5	17.5	63.98	45.95
46.67	54.21	39.9	24.81
95.56	44.82	42.29	67.23
36.11	82.83	81.43	51.22
30.77	14.57	17.55	20.92
27.86	22.5	57.98	24.64
81.11	68.27	27.9	7.194
60.56	43.05	50.5	48.03
67.5	9.167	50.5	12.21

Entusiasmo de largo plazo

ALte	BLte	CLte	DLte
84.21	57.01	52.87	36.75
51.35	39.29	36.82	70.19
18.75	81.38	42.95	67.06
64.38	23	26.05	36.18
41.15	26.89	32.11	27.82
97.14	39.74	38.16	65.59
65	27.45	36.56	30.83
68.75	18.19	60.2	46.67
22.08	59.07	36.72	34.48
95	43.48	58.96	69.97
22.22	51.74	69.39	52.76
26.92	29.13	21.43	26
72.14	24.22	57.58	38.1
85	82.5	35.48	14.17
78.89	37.71	49.86	46.07
67.5	30.5	49.86	19.34

1.- Hipótesis nula H_{O1} No existe una variación entre los niveles de frustración de la prueba sencilla y los niveles de frustración de la prueba compleja

$$\text{Frustración}_{\text{PruebaSencilla}} = \text{Frustración}_{\text{PruebaCompleja}}$$

Tabla 13.- Medias de las frustración de los cuatro laberintos

Frustración	Af	Bf	Cf	Df
Media	71.78	59.3	52.98	56.19

Los datos nos indican que los niveles de frustración varían cuando varía la complejidad de la prueba, por lo que la hipótesis nula H_{O1} : $Frustración_{PruebaSencilla} = Frustración_{PruebaCompleja}$ no se cumple, ya que las medias de la variable frustración no son iguales.

2.- Hipótesis nula H_{O2} No existe una variación entre los niveles de entusiasmo instantáneo de la prueba sencilla y los niveles de entusiasmo instantáneo de la prueba compleja

$$EntusiasmoInstantáneo_{PruebaSencilla} = EntusiasmoInstantáneo_{PruebaCompleja}$$

Tabla 14.- Medias del entusiasmo instantáneo de los cuatro laberintos.

Entusiasmo Inst.	Aie	Bie	Cie	Die
Media	58.27	40.71	42.69	40.28

La hipótesis nula H_{O2} : $EntusiasmoInstantáneo_{PruebaSencilla} = EntusiasmoInstantáneo_{PruebaCompleja}$ no se cumple, ya que las medias de la variable Entusiasmo Instantáneo no son iguales para los diferentes laberintos.

3.- Hipótesis nula H_{O3} No existe una variación entre los niveles de entusiasmo de largo plazo de la prueba sencilla y los niveles de entusiasmo de largo plazo de la prueba compleja

$$EntusiasmoLargoPlazo_{PruebaSencilla} = EntusiasmoLargoPlazo_{PruebaCompleja}$$

Tabla 15.- Medias del entusiasmo de largo plazo de los cuatro laberintos.

EntusiasmoLargoPlazo	ALt	BLt	CLt	DLt
Media	60.03	41.96	44.06	42.62

De manera similar la tercera hipótesis nula H_{O3} $EntusiasmoLargoPlazo_{PruebaSencilla} = EntusiasmoLargoPlazo_{PruebaCompleja}$ tampoco se cumple, pues las medias de la variable no cumplen la igualdad.

4.- Hipótesis nula H_{03} No existe una correlación entre los niveles de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo en cada etapa de complejidad de la prueba.

$$r(\text{Frustración}, \text{EntusiasmoInstantáneo}, \text{EntusiasmoLargoPlazo}) = 0$$

Para evaluar la cuarta hipótesis nula, que asume que no existe una correlación entre los niveles de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo en cada etapa de complejidad de la prueba, calculamos el coeficiente de correlación para cada variable con las herramientas que provee Excel para conocer la intensidad de la relación lineal de los niveles de cada variable entre los diferentes laberintos.

Tabla 16.- Coeficientes de correlación para cada variable.

FRUSTRACION

	<i>Af</i>	<i>Bf</i>	<i>Cf</i>	<i>Df</i>
Af	1			
Bf	0.41437741	1		
Cf	0.56275848	0.72683025	1	
Df	0.59061265	0.6947174	0.79576194	1

.

ENTUSIASMO
INSTANTANEO

	<i>Aie</i>	<i>Bie</i>	<i>Cie</i>	<i>Die</i>
Aie	1			
Bie	0.16552504	1		
Cie	-0.26001094	0.38260539	1	
Die	0.21899768	0.38957796	0.30372498	1

ENTUSIASMO DE LARGO PLAZO

	<i>ALte</i>	<i>BLte</i>	<i>CLte</i>	<i>DLte</i>
ALte	1			
BLte	-0.16683349	1		
CLte	0.19567108	0.03135198	1	
DLte	0.03448264	0.10551462	0.32953206	1

Extendiendo nuestro análisis, comparamos las mediciones del laberinto sencillo A contra las del laberinto complejo D, ya que creemos que cuando la tarea a resolver es más compleja, los niveles de frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo varían.

Utilizamos los niveles de frustración (f), entusiasmo instantáneo (ie) y entusiasmo de largo plazo (eLt) de cada laberinto que hemos asignado a los vectores numéricos en la plataforma R y comparamos las mediciones de los niveles de frustración entre los laberintos A y D.

Para la variable frustración, definimos la dif.AfDf como la diferencia entre las medias de los laberintos A y D; y graficamos:

```
>dif.AfDf<-(Af-Df)
>fit.difAfDf<-lm(Df~Af)
>plot(Df~Af)
>abline(fit.difAfDf)
```

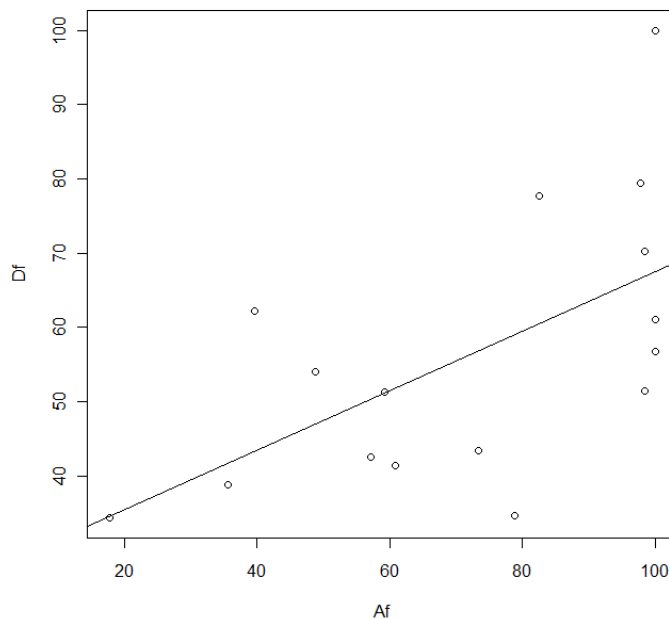


Figura 74. Niveles de frustración: Laberinto A vs. laberinto D

Posteriormente calculamos la función “t.test” para calcular al valor p (p-value) que es la probabilidad de que la hipótesis nula sea cierta. No podemos refutar la hipótesis nula si obtenemos un $p\text{-value} > 0.05$.

```
>t.test(dif.AfDf)
```

```
> t.test(dif.AfDf)

      One Sample t-test

data:  dif.AfDf
t = 2.8425, df = 15, p-value = 0.01235
alternative hypothesis: true mean is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 3.900254 27.282246
sample estimates:
mean of x
 15.59125
```

Para la variable entusiasmo instantáneo, definimos la dif.AieDfie como la diferencia entre las medias de los laberintos A y D; y graficamos:

```
> dif.AieDfie<-(Aie-Die)
> fit.difAieDie<-lm(Die~Aie)
> plot(Die~Aie)
> abline(fit.difAieDie)
```

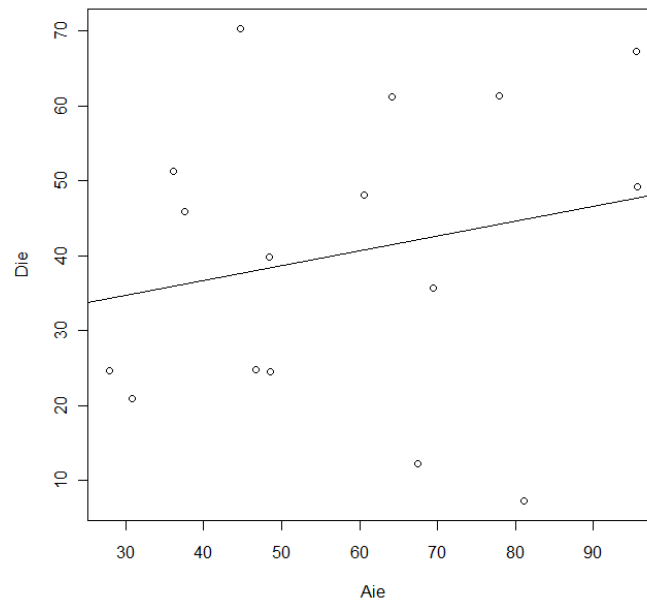


Figura 75. Niveles de entusiasmo instantáneo: Laberinto A vs. laberinto D

Calculamos la función “t.test” para obtener el valor p (p-value) de los niveles de entusiasmo instantáneo.

```
> t.test(dif.AieDie)
```

```
> t.test(dif.AieDie)

      One Sample t-test

data:  dif.AieDie
t = 2.777, df = 15, p-value = 0.0141
alternative hypothesis: true mean is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 4.181286 31.790714
sample estimates:
mean of x
 17.986
```

Para la variable entusiasmo de largo plazo, definimos la dif.ALtDLt como la diferencia entre las medias de los laberintos A y D; y graficamos:

```
> dif.ALtDLt <- (ALt - DLt)
> fit.difAD <- lm(DLt ~ ALt)
> plot(DLt ~ ALt)
> abline(fit.difAD)
```

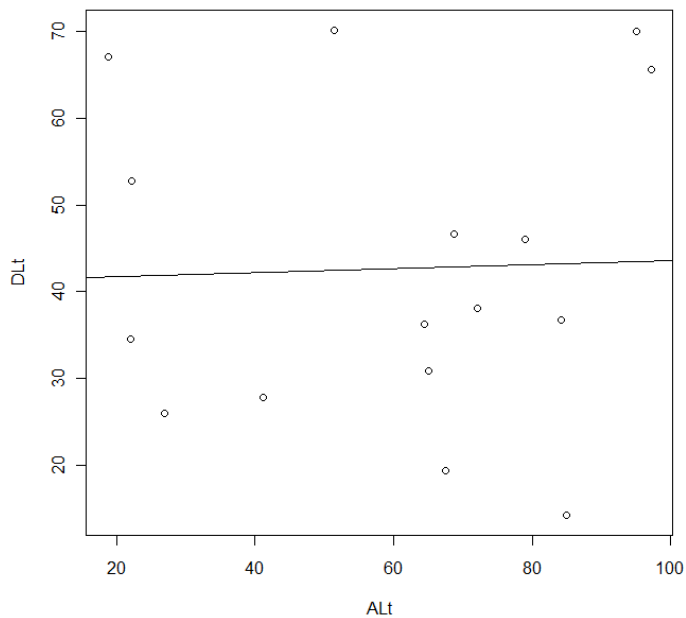


Figura 76. Niveles de entusiasmo de largo plazo del Laberinto A vs. laberinto D

Calculamos la función “t.test” para obtener el valor p (p-value) de los niveles de entusiasmo de largo plazo.

```
> t.test(dif.ALtDLt)
```

```

> t.test(dif.ALtDLt)

One Sample t-test

data:  dif.ALtDLt
t = 2.2015, df = 15, p-value = 0.04377
alternative hypothesis: true mean is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.553973 34.258527
sample estimates:
mean of x
 17.40625

```

5.5 Presentación de Resultados

Para los niveles de frustración (Hipótesis nula Ho1), obtuvimos un p-value=0.01235.

Como el p-value=0.01235 < 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula para los niveles de frustración.

Para los niveles de entusiasmo instantáneo (Hipótesis nula Ho2), obtuvimos un p-value=0.0141.

Como el p-value=0.0141 < 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula para los niveles de entusiasmo instantáneo.

Para los niveles de entusiasmo de largo plazo (Hipótesis nula Ho3), obtuvimos un p-value=0.04377.

Como el p-value=0.04377 < 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula para los niveles de entusiasmo de largo plazo.

De las Tablas 13, 14 y 15 podemos ver la media de las variables tiene el siguiente comportamiento:

Tabla 17.- Media de las variables de cada laberinto.

Laberinto	A (sencillo Rectangular)	B(complejo Rectangular)	C(Sencillo Circular)	D(Complejo Circular)
Frustración	71.78	59.3	52.98	56.19
Entusiasmo Instantáneo	58.27	40.71	42.69	40.28
Ent.Largo Plazo	60.03	41.96	44.06	42.62

En cada laberinto observamos que la medida más alta es la de la frustración; seguida por el entusiasmo instantáneo y como la medida más baja está el entusiasmo de largo plazo. La gráfica de la Figura 77 muestra este comportamiento.

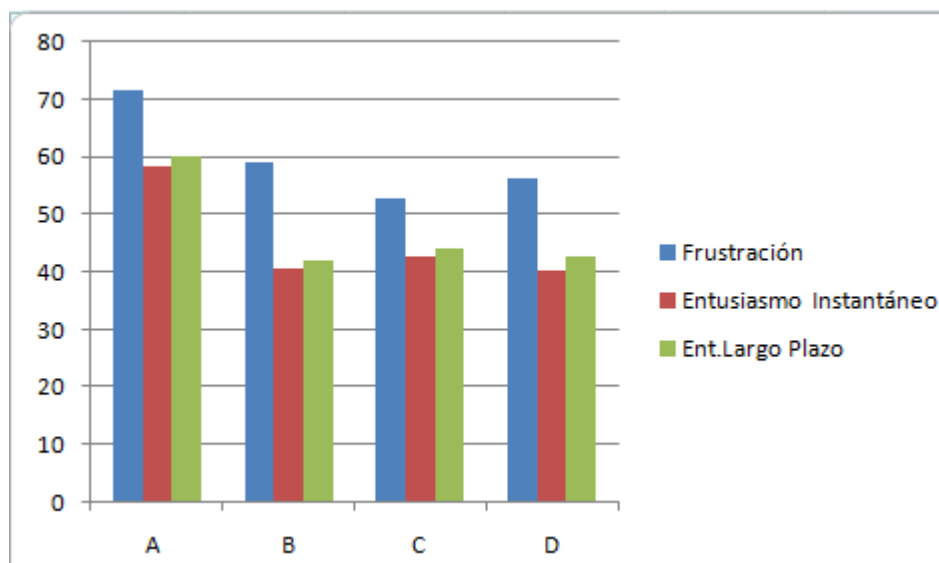


Figura 77. Comportamiento de las variables en cada laberinto.

De manera adicional, observamos que la Tabla 16, que muestra los coeficientes de correlación de las variables, indica que para el entusiasmo instantáneo y el entusiasmo de largo plazo no existe una correlación significativa entre esos estados emocionales y la complejidad de la tarea realizada.

Sin embargo, los índices de correlación de la variable frustración muestran en general un incremento conforme aumenta la complejidad, con la excepción del Laberinto B con respecto al laberinto D. Los índices de correlación entre los niveles de frustración de los laberintos son en general significativos.

$$r(Af,Bf)= 0.41437741$$

$$r(Af,Cf)= 0.56275848$$

$$r(Af,Df)= 0.59061265$$

$$r(Bf,Cf)= 0.72683025$$

$$r(Bf,Df)= 0.6947174$$

$$r(Cf,Df)= 0.79576194$$

Para las variables entusiasmo instantáneo (ei) y entusiasmo de largo plazo (eLt) encontramos los siguientes índices de correlación entre ellas:

Laberinto A: $r(Aei, AeLt) = 0.68858572$

Laberinto B: $r(Bei, BeLt) = 0.862169573$

Laberinto C: $r(Cei, CeLt) = 0.909445435$

Laberinto D: $r(Dei, DeLt) = 0.931110285$

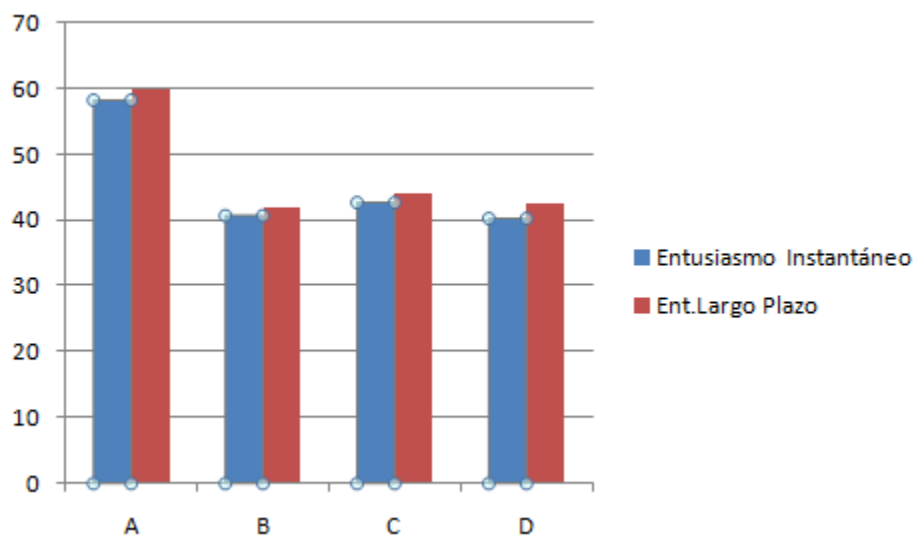


Figura 78. Comportamiento del entusiasmo instantáneo y el entusiasmo de largo plazo en cada laberinto.

5.6 Conclusiones parciales

Las herramientas disponibles a través del software y el hardware libres permiten crear proyectos de bajo costo que enriquecen la investigación. Los contratiempos técnicos que surgieron en el proceso de crear el laberinto con una plataforma movable destacan la necesidad de adentrarse en las habilidades de la programación. *Processing* ofrece un lenguaje de alto nivel con la ventaja de un aprendizaje relativamente sencillo.

Como los dispositivos son de importación, nos enfrentamos a la necesidad de adaptar los recursos disponibles para subsanar algunos requerimientos, como el caso de los fieltros para mantener húmedos los sensores.

Los experimentos que se realizan en condiciones controladas facilitan el trabajo de interpretación de datos. Sin embargo, no representan condiciones realistas de aprendizaje o realización de tareas, ya que el individuo está aislado, sin distracciones del entorno. Estas condiciones no reproducen las condiciones cotidianas de estudio o trabajo.

Las versiones recientes del software *EmoKeyTM* han solucionado algunas de las limitaciones que tenían sus versiones originales, lo que facilita el trabajo futuro de investigación. La propuesta para obtener las variaciones de los estados emocionales en un archivo Word a través de la herramienta *EmoKeyTM* no dio los resultados esperados por que esta herramienta permite la comparación del grado de intensidad de un estado emocional y no genera la respuesta ante una igualdad.

La administración de datos es complicada ya que se maneja más de un *software* a la vez por lo que se recomienda la participación de dos o más investigadores en el experimento con la finalidad de coordinar esfuerzos y facilitar el registro de datos.

El Laberinto A, a pesar de ser el más sencillo, generó datos alejados de los otros tres laberintos que eran más difíciles de solucionar. Creemos que al ser esta la primera tarea que el usuario enfrenta, las mediciones pueden estar influidas por el esfuerzo del usuario al aprender a controlar la plataforma móvil bajo la presión de solucionar el laberinto.

El análisis visual de los gráficos de caja indica que los valores mínimos de frustración sufren un incremento, que las pruebas A y B muestran una mayor dispersión en la distribución de los datos, mientras que las pruebas C y D muestran una menor dispersión en la distribución. Las mediciones de las pruebas B, C y D tienen una asimetría positiva o sesgada a la derecha. Los valores de entusiasmo instantáneo en las pruebas A y B tienen una asimetría positiva (las mediciones con los menores puntajes son más homogéneas) y los de las pruebas C y D tienen una asimetría negativa o sesgada a la izquierda (las mediciones con mayores puntajes son más homogéneas). El entusiasmo de largo plazo en las pruebas B, C y D tiene una asimetría positiva, es decir, las mediciones con menores

puntajes de la escala son más homogéneas y las mediciones con puntajes mayores están más dispersas.

El análisis estadístico de los datos permitió rechazar la hipótesis nula para los niveles de frustración, la hipótesis nula para los niveles de entusiasmo instantáneo y la hipótesis nula para los niveles de entusiasmo de largo plazo.

En cada estado de la variable independiente los niveles de frustración fueron más altos que los de las otras variables dependientes, seguidos por el entusiasmo instantáneo, con el entusiasmo de largo plazo con los valores más bajos.

Los coeficientes de correlación de las variables muestran que para el entusiasmo instantáneo y el entusiasmo de largo plazo no existe una correlación significativa entre esos estados emocionales y la complejidad de la tarea realizada.

Los índices de correlación de la variable frustración muestran un incremento conforme aumenta la complejidad y son en general significativos. Los índices de correlación entre los niveles de entusiasmo instantáneo y los niveles de entusiasmo de largo plazo de los laberintos son significativos.

Sin embargo quedan dudas de que los resultados obtenidos sean concluyentes, debido al tamaño de la muestra y a que las mediciones pueden ser afectadas por la intervención de otras variables (como en el caso de la primera prueba), o influenciadas por factores externos ya que las pruebas se realizaron en un lugar tranquilo pero no controlado.

CONCLUSIONES

El proceso de análisis, reflexión y recolección de datos realizado durante la presente investigación nos condujo a obtener una serie de conclusiones que consideramos importantes. Algunas de estas fueron presentándose a lo largo de cada capítulo y permitieron construir gradualmente nuestra base teórica-metodológica, algunas se obtuvieron a partir de la experimentación o se infieren de la experiencia obtenida en este ejercicio de investigación. Aquí presentamos nuestras conclusiones, reflexiones y propuestas finales.

Conclusiones a partir de la construcción de nuestro marco teórico.

A pesar de los grandes avances tecnológicos y científicos en la materia, la comprensión de la actividad cognitiva al realizar una tarea sigue dejando grandes lagunas. No podemos explicar aún cómo trabaja el cerebro humano durante el proceso de aprendizaje. Existen grandes incógnitas sobre la relación entre los factores emocionales y los procesos de adquisición del conocimiento, en especial durante el aprendizaje escolar.

Actualmente la neurociencia ofrece una de las bases más sólidas para tratar de entender y explicar el aprendizaje y la mejor manera de conseguirlo, hecho que puede contribuir al diseño de materiales multimedia.

Si bien los procesos cognitivos involucran diversas partes del cerebro, es relevante la actividad neuronal en los lóbulos frontales por su participación en la solución de problemas, la concentración y el juicio, así como la coordinación de las expresiones faciales con los estados de ánimo y los sentimientos.

Las interfaces cerebro computadora como el dispositivo *EPOCTM* nos permiten la investigación de tres áreas de respuesta importantes: la actividad cognitiva del usuario, la respuesta emotiva y parte del lenguaje corporal (a través de las expresiones faciales). Otras interfaces (como las pertenecientes a *NeuroSky*) sólo ofrecen una.

Para un mejor aprovechamiento de los datos que se pueden obtener con las interfaces cerebro computadora es necesaria la capacitación adicional en el campo de la electroencefalografía.

Conclusiones a partir de los resultados obtenidos.

La interfaz utilizada en el desarrollo de la investigación nos permitió obtener información cuantitativa y específica sobre las tres variables señaladas: frustración, entusiasmo instantáneo y entusiasmo de largo plazo.

La relación entre frustración y el nivel de complejidad de la tarea resultó ser consistente con cada caso, por lo que es posible considerar que sí existe una clara relación entre ambas variables, es decir: a mayor nivel de complejidad, mayor nivel de frustración.

Este hecho, sin embargo, representa nuevos retos a los docentes, diseñadores y desarrolladores de materiales educativos: ¿es conveniente sólo diseñar actividades que no representen un alto nivel de complejidad para evitar la frustración en los alumnos?,

En cuanto al nivel de entusiasmo instantáneo la relación no fue clara. Sin embargo, es posible pensar que el nivel de entusiasmo tiene más que ver con dos factores: la novedad de la tarea, la experiencia durante la actividad y el tiempo de duración. No obstante no podemos afirmarlo en virtud de que el diseño experimental no nos permitió obtener evidencias al respecto.

Para el entusiasmo de largo plazo no encontramos una relación clara; el entusiasmo de largo plazo no siempre aumenta si la tarea aumenta en su complejidad. Las variaciones en las mediciones no parecen estar relacionadas con la dificultad de la tarea que se realiza. Sin embargo encontramos que ambos entusiasmos (instantáneo y de largo plazo) sí muestran una relación altamente significativa entre sí, es decir, si uno de ellos disminuye el otro también decrece; y esta correspondencia se hace más estrecha conforme la tarea que aumenta se hace más compleja.

Quedan dudas de que los resultados obtenidos sean concluyentes, debido al tamaño de la muestra y a que las mediciones pueden ser afectadas por la intervención de otras variables (como en el caso de la primera prueba), o influenciadas por factores externos ya que las pruebas se realizaron en un lugar tranquilo pero no controlado. La experimentación y toma de mediciones en condiciones controladas es recomendable, sin embargo éste dispositivo, al ser inalámbrico permite evaluar al usuario en condiciones menos restringidas, por lo que estímulos de la vida diaria pueden ser integrados al experimento, ofreciendo una situación más apegada a la realidad del usuario.

Más allá del uso de una interfaz cerebro computadora como herramienta para medir emociones y actividad del cerebro, esta puede ser utilizada como controlador de otros dispositivos al asignar acciones específicas a las señales del usuario registradas; sin embargo esto conlleva un proceso de entrenamiento que debe ser completado para que el aparato identifique la señal (que puede ser un pensamiento, una emoción o un gesto facial) y le asocie la acción correspondiente.

Recomendaciones y sugerencias

Al diseñar material educativo digital debemos considerar los procesos automatizados e inconscientes del individuo, así como sus emociones, pero esto no es posible sin un entendimiento de cómo reacciona el sujeto ante los estímulos que se le presentan.

Esta investigación es apenas nuestro primer acercamiento al estudio de las reacciones del sujeto ante la resolución de un problema. La interfaz cerebro-computadora *EPOC*TM ofrece una herramienta interesante para la investigación de los estados emocionales y cognitivos en la solución de tareas.

Los resultados obtenidos, que no son los esperados al inicio de este proyecto, muestran que es necesario seguir investigando en este tema y realizar más y mejores experimentos, que involucren grupos más grandes y tareas más específicas.

Entre las líneas de investigación posibles, nos llaman la atención las siguientes:

a) ¿Puede ser considerada la frustración como una variable que ayude a determinar el nivel de complejidad del contenido que el usuario deba asimilar? y de ser así, ¿qué otras variables que puedan ser registradas y medidas por este dispositivo deberían ser consideradas como guías? Recomendamos el estudio de la atención, por la relación que esta tiene con la cognición, la memoria, y la acción.

b) Basados en los experimentos de resonancia magnética funcional, consideramos de gran interés y utilidad, investigar si las regiones del cerebro involucradas con los distintos tipos de carga cognitiva presentan una actividad que pueda ser registrada y diferenciada por el dispositivo *EPOC*TM, de manera que podamos establecer una relación entre la carga

cognitiva (intrínseca, externa o relacionada) del usuario y los datos obtenidos por el dispositivo.

c) La integración de este dispositivo con otras tecnologías, como pueden ser los lentes o dispositivos de seguimiento de la vista (para el estudio del procesamiento de la información visual), los dispositivos de realidad virtual o los sensores biométricos.

d) ¿De qué manera las oscilaciones Alfa (α), Teta (θ), Beta (β) y Gama (γ) pueden relacionarse con las respuestas del usuario durante el aprendizaje?.¿Podemos por ejemplo, corroborar que las oscilaciones Gama se incrementan con la actividad cognitiva compleja y que las oscilaciones Teta varían ante la tensión emocional, la frustración y la decepción?

También consideramos relevante la investigación que pueda hacerse con respecto a la mercadotecnia (*neuromarketing*), la generación de material sonoro o visual basado en las emociones y las ondas cerebrales, y la evaluación de la respuesta del usuario ante los estímulos visuales. Otras líneas de investigación incluyen la mecatrónica (en el área del control de equipo mecánico a través de pensamientos y emociones), la comunicación, el trabajo colaborativo y el tratamiento de fobias.

El trabajo realizado en esta investigación nos ofrece una perspectiva más amplia de la interacción que el humano hace con su entorno y nos deja reflexionando acerca de una serie de preguntas que exponemos a continuación:

- ¿Es viable la adaptación de las interfaces cerebro-computadora al paradigma actual de interacción entre humanos y computadoras, o es necesario un nuevo diseño de interacción?
- ¿Hasta qué punto puede la interfaz cerebro computadora ayudar a personalizar el despliegue de contenidos educativos basándose en las reacciones de cada usuario al material presentado?
- ¿Puede utilizarse como detector de la carga cognitiva en el usuario?
- ¿Puede éste dispositivo asistir al usuario en la creación de contenidos artísticos?; es decir, ¿puede mantener el usuario su independencia creativa del aparato o estará

limitado por el código de programación (diseñado para transformar las señales cerebrales del usuario en señales de audio o en imágenes y/o animaciones)?

- ¿Cuáles variables (de las que podemos medir con este dispositivo) son relevantes durante el trabajo colaborativo para el buen desempeño de una tarea? ¿El aprendizaje colaborativo influye en el aprendizaje individual?
- ¿Podemos obtener evidencia cuantitativa que corrobore los Principios del Aprendizaje Multimedia? y ¿puede esta interfaz ayudarnos a mejorar el diseño de aplicaciones educativas multimedia?
- ¿Podemos utilizarla como herramienta de evaluación formativa?

Creemos que es necesaria la planeación de más y mejores diseños experimentales, que ayuden a responder estas incógnitas y las inquietudes que surjan en la mente del lector como resultado de este trabajo. Cabe mencionar que un equipo de trabajo que reúna varias disciplinas (ingeniería, diseño, psicología y pedagogía) puede concebir un enfoque amplio y enriquecedor en este campo de investigación.

Por último, es importante considerar que antes de utilizar los medios y de integrar las novedades tecnológicas como instrumentos de aprendizaje, debemos reflexionemos en el efecto que éstos tienen, es decir si ayudan a cumplir con el objetivo principal que es apoyar el aprendizaje.

No podemos dar la espalda al progreso tecnológico, pero debemos asumir la responsabilidad de nuestro trabajo como diseñadores a través del análisis, la capacitación y la investigación.

BIBLIOGRAFIA

Aguado-Aguilar, L., Espinoza Pardo, G., Oruro Puma, E., Carrión, D., (2010). *Aprendizaje, Memoria y Neuroplasticidad*. Recuperado en Julio, 2011 de:

http://www.ciberdocencia.gob.pe/archivos/aprendizaje_memoria_neuroplasticidad.pdf

Ainsworth, S. (2008). *How should we evaluate multimedia learning environments*. In J.-F. Rouet & R. Lowe & W. Schnotz (Eds.), *Understanding Multimedia Comprehension*. New York: Springer.

Recuperado en Abril, 2011 de:

http://www.psychology.nottingham.ac.uk/staff/Shaaaron.Ainsworth/multimedia_eval.pdf

Alcaraz Romero, V.M., Gumá Díaz, E. (2001). *Texto de neurociencias cognitivas*. México D.F., Manual Moderno.

Arduino. Recuperado en Abril, 2011 de: <http://www.arduino.cc/es/>

Arduino Microcontroller. Recuperado en Abril, 2011 de: <http://www.me.umn.edu/courses/me2011/arduino/>

Asociación Alzheimer de Monterrey, A.C. *La estructura del cerebro*.

Recuperado en Agosto, 2010 de:

<http://www.alzheimermonterrey.com/sitiosespeciales/ninos/cerebro-07-estructura.html>

Asociación Educar. Glosario. Publicaciones de Neurosicoeducación.

Recuperado en Agosto, 2010 de: <http://www.asociacioneducar.com/glosario.php>

Ballesteros, S., (1999). *Memoria humana: investigación y teoría*.

Recuperado en Julio, 2011 de: <http://www.psicothema.com/pdf/323.pdf>

Barea Navarro, R. (2011). *Tema 5: Electroencefalografía*. Universidad de Alcalá, Departamento de electrónica. Instrumentación Biomédica.

<http://es.scribd.com/doc/51087531/electroencefalografia>

Başar, E., (2004). *Memory and Brain Dynamics. Oscillations Integrating Attention, Perception, Learning, and Memory*. Boca Raton: CRC Press LLC.

Bazarrica Ochoa, J.,(2002). *EEG Signal Classification for Brain Computer Interface Applications*.

Recuperado en Noviembre, 2010 de:

<http://es.scribd.com/doc/8888056/bazarricadiplomaproject>

Behrmann,M., Geng, J.J., Shomstein, S.(2004).*Parietal cortex and attention*.

Recuperado en Julio, 2011 de:

<http://www.cnbc.cmu.edu/~behrmann/dlpapers/BehrmannGengShomstein.pdf>

Blum, David E. (1997). *Computer-based electroencephalography: technical basics, basis for new applications, and potential pitfalls*. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology* 106 (1998) 118–126

Recuperado en Junio, 2011 de:

http://www.whatartistprojects.com/myopenarduinoeeeg/wp-content/blogs.dir/2/files/group-documents/1/1291766558-Computer-based_EEG_-_technical_basics_etc.pdf

Bono Cabré, R., (s.f.). Diseños cuasi-experimentales y longitudinales.

Recuperado en Agosto, 2013 de:

<http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/30783/1/D.%20cuasi%20y%20longitudinales.pdf>

Brailowsky, S. (1995). *Las sustancias de los sueños: Neuropsicofarmacología*. México: Fondo de Cultura Económica. ISBN 968-16-4585-5

Buitrago Bolivar, E., Gutiérrez, R.I M., González, J. E., Medina Malo, C., Guio, L.V. (2008). *Aplicación clínica de separación ciega de fuentes y dimensión fractal en la identificación de artefactos oculares de EEG*.

Recuperado en Julio, 2011 de:

<http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/104311440-444.pdf>

Bobrov, P., Frolov, A., Cantor, Ch., Fedulova, I., Bakhnyan, M., Zhavoronkov, A., (2011). *Brain-Computer Interface Based on Generation of Visual Images*. PLoS ONE 6(6): e20674. doi:10.1371/journal.pone.0020674

<http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0020674#pone-0020674-g002>

Bustos Sánchez, A., Coll Salvador, C. (2010). *Los entornos virtuales como espacios de enseñanza y aprendizaje*. Número 44, Volumen XV. ENERO-MARZO de 2010

Recuperado en Mayo, 2013 de:

<http://www.comie.org.mx/v1/revista/visualizador.php?articulo=ART44009&criterio=http://www.comie.org.mx/documentos/rmie/v15/n044/pdf/ART44009.pdf>

Byrnes, J.P. (2001). *Minds, Brains and Learning. Understanding the Psychological and educational Relevance of Neuroscientific Research*. New York: The Guilford Press.

Calvo, R. y Alaejos, R., (2010, Enero 3). *Arduino The Documentary*. [Archivo de Video] Recuperado de: <http://vimeo.com/18390711>

Dirigido por Rodrigo Calvo y Raul Alaejos. Producido por Laboral Centro de Arte. Productor Ejecutivo Gustavo Valera

Candia Gutiérrez, S. (5 Noviembre, 2009). *Tronco encefálico: Mesencéfalo*. Biología 3M.Blog.

Recuperado en Agosto, 2010 de

<http://biol3medio.blogspot.com/2009/11/tronco-encefalico-mesencefalo.html>

Carrillo-Mora, P. (2009). *Sistemas de memoria: reseña histórica, clasificación y conceptos actuales. Primera parte: Historia, taxonomía de la memoria, sistemas de memoria de largo plazo: la memoria semántica*.

http://www.artemisaenlinea.org.mx/acervo/pdf/salud_mental/Sistemas%20de%20memoria.pdf

Clark, R. E. (2010). *Cognitive and neuroscience research on learning and instruction: Recent insights about the impact of non-conscious knowledge on problem solving, higher order thinking skills and interactive cyber-learning environments*. International Conference on Education Research (ICER), Seoul, South Korea.

Recuperado en Mayo, 2013 de:

http://www.cogtech.usc.edu/publications/clark_2010_nonconscious_learning_motivation_icer_9sep2010.pdf

Colom, R., Flores-Mendoza, C. (2001). *Inteligencia y Memoria de Trabajo: La Relación Entre Factor G, Complejidad Cognitiva y Capacidad de Procesamiento*.

Recuperado en Julio, 2011 de:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-37722001000100007

Corrales Villanueva, A. Diseño e implementación de una interfaz cerebro máquina no invasiva basada en microcontroladores para una silla de ruedas controlada por el cerebro. Ciudad Juárez, Mayo, 2010. 62 h. Trabajo de grado (Ingeniero en sistemas digitales y comunicaciones). Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Departamento de ingeniería eléctrica y computación. Disponible en: http://www2.uacj.mx/IIT/IEC/Digitales/PROYECTOS/Documentos_junio_2010/ISENO%20E%20IMPLEMENTACION%20DE%20UNA%20INTERFAZ%20CEREBRO%20MAQUINA%20NO%20INVASIVA%20BASADA%20EN%20MICROCONTROLADORES%20PARA%20UNA%20SILLA.pdf

Corral-Fernández, E. (2007). *Nociones básicas de EEG y epilepsia en adultos en medicina interna*. Recuperado en Julio, 2011 de: <http://www.meiga.info/mbe/eeg.pdf>

Díaz, J.L., (2009). *Mente, cerebro y memoria*. Salud Mental (México) 32: 513-526
Recuperado en Abril, 2011 de:
<http://www.joseluisdiaz.org/wp-content/uploads/2011/03/mente-cerebro-y-memoria.pdf>

Díaz, J.L., (2011). *Curso de Neurociencia cognitiva. VII Memoria*.
Recuperado en Abril, 2011 de:
<http://www.joseluisdiaz.org/wp-content/uploads/2011/04/CN-Memoria.pdf>

Dubuc, B. (2002). *The brain from top to bottom*.
<http://thebrain.mcgill.ca/>

Duque Parra, J.E, Hernán Moscoso y O., Devia Cubillos, A. (2004). El lóbulo insular. Un lóbulo de procesamiento cortical visceral. *Asociación Colombiana de Neurología. Acta Neurológica Colombiana*, Vol 20 No. 2 • Jun 2004 - ISSN 0120-8748
Recuperado en Agosto, 2010 de http://www.acdn.org/acta/2004_20_2_90.pdf

Duque Parra, J.E., Barco Ríos, J.J. y Castaño Molina, C.E. (2001). Un séptimo lóbulo cerebral. *Revista Médica de Costa Rica y Centroamérica*. Octubre, Noviembre y Diciembre, 2001. Año LXVIII - Número 557 - Tomo LVIII
Recuperado en Agosto, 2010 de <http://www.binasss.sa.cr/revistas/rmcc/557/CONTENIDO.html>

Edición electrónica. Biblioteca digital del Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa.
Recuperado en Septiembre, 2010 de
<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/130/html/lassusta.html>

Emotiv, (2011). *Emotiv Software Development Kit: User Manual for Release 1.0.0.4*
Recuperado en Abril, 2011 de:
<http://www.emotiv.com/upload/manual/sdk/Research%20Edition%20SDK.pdf>

Estévez-González, A., García-Sánchez, C., Junqué, C. (1997). *La atención: una compleja función cerebral*.
Recuperado en Octubre, 2011 de:
http://enriquegbertranou.com.ar/media/docs/atencion_dividida/Ref.atenci%C3%B3n.pdf

Evocov (s.f.), *Magnetoencefalografía*.
Recuperado en Julio, 2011 de:
<http://evocog.org/es/home/tecnicas-de-investigacion/256-magnetoencefalografia-meg.html>

- Feick, E., Leenders, T., Marlin, A., Smith, D. (2008). *Neuroanatomy*. University of Waterloo. Recuperado en Julio, 2011 de: <http://ahsmail.uwaterloo.ca/~amarlin/neuroanatomy.html>
- Flores Lázaro, J.C., Ostrosky-Solís, F.(2008). *Neuropsicología de Lóbulos Frontales, Funciones Ejecutivas y Conducta Humana*. Revista Neuropsicología, Neuropsiquiatría y Neurociencias, Abril 2008, Vol.8, No. 1, pp. 47-58.
Recuperado en Abril, 2011 de: <http://es.scribd.com/doc/51185440/lobulos>
- García Barreno, P.(2001). *Las tecnologías de la imagen en medicina*. Fundación San Millán de la Cogolla. Recuperado en Agosto, 2010 de:
<http://portallengua.fsanmillan.org/portallengua/fcc/libro.jsp?isbn=84-239-1776-2&npagina=81>
- Gellatly, A. y Zárate, O. (2000). *Mente y Cerebro para Principiantes*. Editado por Richard Appignanesi. Ed. Era Naciente, Buenos Aires, Argentina. 175 pp.)
Ubicación UAM: QP / 376 / G4.4.28
- Ginarte Arias, Y., (2007). *La evaluación neuropsicológica de la atención*.
Recuperado en Julio, 2011 de:
http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/gericuba/la_evaluacion_neuropsicologica_de_la_atencion.pdf
- Gluck, M. A., Mercado, E., Myers C.E. (2009). *Aprendizaje y Memoria*. Del cerebro al comportamiento. México, Mc.Graw Hill.
- Gómez Beldarrain, M.(s.f.). *La corteza frontal y su anatomía: descripción y circuitos*. Curso de Neurología de la conducta y demencias. Capítulo 14.
Disponible en: http://oaid.uab.es/nnc/html/entidades/web/14cap/c14_02.html
- Góngora Costa, B. *Propuesta de un modelo explicativo del efecto de la memoria fonológica a corto plazo sobre el desempeño lingüístico en niños con trastorno específico del lenguaje (TEL) utilizando un modelo de ecuaciones estructurales*. Santiago, Agosto 2009, 96 h., Trabajo de grado (Magíster). Universidad de Chile, Facultad de Filosofía y Humanidades, Centro de estudios Cognitivos.
Disponible en: http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2009/gongora_be/sources/gongora_be.pdf
- González Garrido, A.A., Ramos Loyo, J., (2006). *La atención y sus alteraciones: del cerebro a la conducta*. México, D.F. El Manual Moderno. Recuperado en Julio, 2011 de:
<http://books.google.com/books?id=MJ59hywKArYC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- González Gutiérrez, J.L., Moreno Jiménez, B., Garrosa Hernández, E. (2005). *Carga mental y fatiga laboral: Teoría y evaluación*. Madrid, Ediciones Pirámide.
- Graimann, B., Allison, B.Z., y Pfurtscheller, G. *Brain-Computer Interfaces: Revolutionizing Human-Computer Interaction, "An introduction to brain – computer interface (BCI) systems"*, (Ed. Graimann, B., Allison, B.Z., & Pfurtscheller, G. Springer Publishing). (en impresión).
Disponible en: http://future-bnci.org/images/stories/01_graimann.pdf
- Haines, D.E., Raila, E.A. y Terrell, A.C. (2003). Introducción a la estructura del sistema nervioso central y a la neuroimagen. En Haines, D.E. (Ed.) *Principios de neurociencia*. (Segunda edición). (pp. 4-14). Madrid: Elsevier España.

Haines, D.E. y Mihailoff, G.A. (2003). *Telencéfalo*. En Haines,D.E. (Ed.) *Principios de neurociencia*. (Segunda edición). (pp. 236-252). Madrid: Elsevier España.

Hutchins, J.B., Naftel, J.P., Ard, M.D. (2003). Biología celular de las neuronas y la glía. En Haines,D.E. (Ed.) *Principios de neurociencia*. (Segunda edición). (pp. 236-252). Madrid: Elsevier España.

Ikehara, C.S., Crosby, M.E.(2005). *Assessing Cognitive Load with Physiological Sensors*. HICSS '05 Proceedings of the Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences - Volume 09.

Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1043302>

IQB, (2010). *Anatomía y fisiología del sistema nervioso*. Instituto Químico Biológico. España.

Recuperado en Agosto, 2010 de <http://www.iqb.es/neurologia/a002.htm>

IQB, (2010, b). Curso de Bioquímica. Biología molecular de la célula. Instituto Químico Biológico. España.

Recuperado en Agosto, 2010 de http://www.iqb.es/cbasicas/bioquim/cap9/c9s02_01.htm

INE, (2007) Instituto Nacional de Ecología.

Recuperado en Junio, 2011 de: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/gacetas/399/rosete.html>

Johnson, A., Proctor, R.W. (2004). *Attention: Theory and Practice*. Thousand Oaks, Sage Publications.

Recuperado en Julio, 2011 de:

http://books.google.com/books?id=Wwu4W_aO8oAC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Kandel, E. R., (2008). *Memories are Made of This*. Holiday Lectures on Science.

Disponible en: http://www.youtube.com/watch?v=K0cnyqzqgkQ&feature=mfu_in_order&list=UL

Loughran, S.P., Wood, A.W., Barton, J.M., Croft, R.J., et al. (s.f.). The effect of electromagnetic fields emitted by mobile phones.

Recuperado en Agosto, 2013 de: <http://www.rfcom.ca/clinic/loughransp.shtml>

Lynch, J.C. (2003). Corteza cerebral. En Haines, D.E. (Ed.) *Principios de neurociencia*. (Segunda edición). (pp. 506-520). Madrid: Elsevier España.

Maestú,C.,Gómez-Utrero, E.,Piñeiro,R., Sola,R.G. (1999). *Magnetoencefalografía: una nueva técnica de diagnóstico funcional en neurociencia*. Recuperado en Junio, 2011 de:

<http://www.neurorgs.com/inv/publi/Pdf/magnetoencefalografia.pdf>

Malmivuo,J., Plonsey, R. (1995). Bioelectromagnetism .Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields. *Chapter 13: Electroencephalography*.

Recuperado en Julio, 2011 de: <http://www.bem.fi/book/>

Manso, A.J., Ballesteros, S. (2003). *El papel de la agenda visoespacial en la adquisición del vocabulario ortográfico*. Oviedo, Psicothema. Año/vol.15, numero 003, pp.388-394.

Recuperado en Julio de 2011 de: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/727/72715308.pdf>

Marantz, A., Harker Rhodes IV,C. (2006). *Basic Principles of Magnetoencephalography*

Recuperado en Julio, 2011 de: <http://web.mit.edu/kitmitmeg/>

Marrero, E. (2005). *La neurona*. Universidad de Puerto Rico.
Disponible en: <http://academic.uprm.edu/~eddiem/psic3001/id36.htm>

Martínez Vera, N. P., *Evaluación de la conectividad cerebral bajo fármacos mediante análisis no lineal del EEG*. Barcelona, Marzo, 2009. 61h. Trabajo de grado (Maestría en Ingeniería Biomédica). Universitat Politècnica de Catalunya, Universitat de Barcelona. Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial.
Disponible en: http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/10655/1/Memoria_PFE_NMV.pdf

Mayer, R., (Ed.). (2005). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Nueva York: Cambridge University Press.

Medical Research Council (2003). *The Brain*. Recuperado en Abril, 2010 de:
<http://www.mrc.ac.uk/consumption/groups/public/documents/content/mrc006321.pdf>

MedlinePlus (2010). *Tomografía por emisión de positrones*.
Recuperado en Junio, 2011 de: <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/003827.htm>

Mihailoff, G.A., Haines, D.E., y May, P.J.(2003). Mesencéfalo. En Haines,D.E. (Ed.) *Principios de neurociencia*. (Segunda edición). (pp. 188-198). Madrid: Elsevier España.

Molist, M., (2004). *El "software" libre inspira el movimiento del "hardware" abierto*.
Recuperado en Abril, 2011 de: <http://ww2.grn.es/merce/2004/openhard.html>

Monge, S. (19 mayo, 2010). *Neuromarca*. Blog.
Recuperado en Junio, 2011 de: <http://neuromarca.com/neuromarketing/fmri/>

Monge Benito,S., Fernández Guerra, V. (2011). Neuromarketing: Tecnologías, Mercado y Retos.
Recuperado en Agosto, 2013 de: <http://revistas.ucm.es/index.php/PEPU/article/view/37862>

MRC (2009). *The brain*. Medical Research Council. London.
Recuperado en Agosto, 2010 de <http://www.mrc.ac.uk>

Nemours Foundation (s.f.). *El cerebro y el sistema nervioso*. Recuperado el 22 de Junio, 2010 de
http://kidshealth.org/parent/en_espanol/general/brain_nervous_system_esp.html#

Neuroanatomía, (2009). *Características de la glía*. Facultad de medicina. Universidad de La Frontera. Chile.
Recuperado en Septiembre, 2010 de:
http://www.med.ufro.cl/Recursos/neuroanatomia/archivos/3_neurohistologia_archivos/Page414.htm

Neurology investigations,(19 de agosto, 2008). 10-20 system of electrode placement. Blog.
Recuperado en Julio, 2011 de
<http://neurologysimplified.blogspot.com/2008/08/normal-eeg-10-20-system-of-electrode.html>

Newsroom (2009). *Astrocytes Help Separate Man from Mouse*. University of Rochester. Medical center. Marzo 23, 2009.
Recuperado en Septiembre, 2010 de:
<http://www.urmc.rochester.edu/news/story/index.cfm?id=2422>

NSF (National Science Foundation), (2008). *Fostering Learning in the Networked World: The Cyberlearning Opportunity and Challenge*.

Recuperado en Mayo, 2013 de: <http://www.nsf.gov/pubs/2008/nsf08204/nsf08204.pdf>

Nolte, J., Angevine, J.B, Jr. (2009). *El encéfalo humano en fotografías y esquemas*. Tercera edición. Barcelona, Elsevier Mosby.

Recuperado en Abril, 2011 de:

http://books.google.com/books?id=6_r1_iHAuL8C&printsec=frontcover&vq=afernte+eferente&hl=es#v=onepage&q&f=false

OECD. (2003). *Glosario: conceptos y abreviaturas*. Organización para la cooperación y el desarrollo económico. Cerebro y aprendizaje.

Recuperado en Agosto, 2010 de <http://www.isftic.mepsyd.es/w3/oecd/dataoecd/8/7/glosario.htm#top>

Ortega Loubon, Ch., Franco, J.C.(2010). Neurofisiología del aprendizaje y la memoria. Plasticidad Neuronal. *iMedPub Journals*. Vol.6 No.1:2. doi:10.3823/048

Recuperado en Marzo, 2011 de: <http://www.archivosdemedicina.com>

Ortiz Alonso, T. (2009). *Comunicación neuronal: Aproximación a la conducta desde los ritmos cerebrales*.

Recuperado en Julio, 2011 de: <http://bitrum.wordpress.com/2009/05/18/la-comunicacion-neuronal-aproximacion-a-la-conducta-desde-los-ritmos-cerebrales/>

Oostenveld, R., Praamstra, P., (2001). *The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements*. Consultado en Julio, 2011 de:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.116.7379&rep=rep1&type=pdf>

Pasantes, H.(1997). *De neuronas, emociones y motivaciones*. Mexico: Fondo de Cultura Económica. ISBN 968-16-5387-4

Edición electrónica. Biblioteca digital del Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa.

Recuperado en Septiembre, 2010 de

<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/158/html/neuronas.html>

Pascual Millán, L.F., (s.f.). *Memoria de trabajo y enfermedad de Alzheimer*

Recuperado en Julio, 2011 de: http://www.janssen.es/content/backgrounders/janssen-cilag.es_spa/local_content/enciclopedia_online14.pdf

Pass, F., Renkl, A., Sweller, J. (2003). *Cognitive load theory and instructional design: Recent developments*.

Recuperado en Julio, 2011 de:

<http://es.scribd.com/doc/47751/Sweller-Cognitive-Load-Theory-and-Instructional-Design>

Pass, F., Renkl, A., Sweller, J. (2004). *Cognitive load theory : Instructional implications of the interaction between information structures and cognitive architecture*. Instructional Science 32: 1–8, 2004.

Recuperado en Julio, 2011 de:

http://meds.queensu.ca/ohse/assets/cognitive_load_theory_pass_2004_.pdf

Pass, F., Tuovinen, J., Tabbers, H., van Gerven, P., (2003). *Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory*. Recuperado en Julio, 2011 de:

<http://coursesite.uhcl.edu/hsh/PeresSC/Classes/PSYC5911www/Measurecogload.pdf>

Pass, F., van Merriënboer, J., (1994), *Instructional control of cognitive load in the training of complex cognitive tasks*. Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/fmp574k343j6772l/>

Portalesmedicos.com, (2010). *Nasion*.

Recuperado en Julio, 2011 de: http://www.portalesmedicos.com/diccionario_medico/index.php/Punto_nasal

Porter, R.S.(Ed.), (2003). Biology of the Nervous System. En *The Merck manual home health handbook*. (pp. 623-628). NJ: Merck Research Laboratories.

Contenido en línea (2009).The Merck manuals, medical online library.

Recuperado en Agosto, 2010: <http://www.merck.com/mmhe/sec06/ch076/ch076a.html>

Processing. Recuperado en Abril, 2011 de: <http://processing.org/>

Pulido Rivas, P.(1995).Localización anatómico-funcional en la corteza cerebral. Aplicación de un sistema de integración de imágenes como guía para la resección de lesiones cerebrales corticales. Tesis doctoral.

Departamento de cirugía. Facultad de medicina. Universidad Autónoma de Madrid.

Disponible en: <http://www.neurorgs.com/inv/Pdf/TESIS%201.PPR.pdf>

Quian Quiroga, R.*Quantitative analysis of EEG signals: Time-frequency methods and Chaos theory*. ,

Diciembre,1998.146 h. Trabajo de grado (Doctorado).Institute of Physiology - Medical University Lübeck and Institute of Signal Processing - Medical University Lübeck.

Disponible en: <http://www.vis.caltech.edu/~rodri/papers/thesis.pdf>

RAE, (2010). Real Academia Española.

Recuperado en Abril, 2011 de: <http://rae.es/rae.html>

Recursos Educativos en Español para la Medicina de Emergencia (REEME). University of Arizona, EE.UU.

Recuperado en Junio, 2010 de: <http://www.reeme.arizona.edu/>

Rockhold, R.W. (2003). *Base química de la comunicación neuronal*. En Haines,D.E. (Ed.) *Principios de neurociencia*. (Segunda edición). (pp. 188-198). Madrid: Elsevier España.

Rodríguez Bermúdez, García Laencina, Brizión, Roca Dorda, (s.f.).Adquisición, procesamiento y

clasificación de señales EEG para el diseño de sistemas BCI basados en imaginación de movimiento.

Recuperado en Agosto, 2013 de: <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/3295/1/apc.pdf>

Román Lapuente, F., Sánchez López, M. del P., Rabadán Pardo, M. J. (s.f.). Técnicas de neuroimagen, Práctica 2.

Recuperado en Junio, 2011 de: <http://ocw.um.es/cc.-sociales/neuropsicologia/practicas-1/practica-2.pdf>

Rose,Charlie.(Executive Producer), Kandel, E.R., Squire, L., Small, S.,Milner, B. y Hardy, J.(2010, Marzo 25).

The Aging Brain [episodio de serie de televisión: Charlie Rose brain series]. New York, PBS. WNET.

Disponible en: <http://www.charlirose.com/view/interview/10929>

Sabatini,G.A., (s.f.). *Clasificación de los sistemas Interface mente-cerebro máquina (IMCM)*.

Recuperado en Julio, 2011 de:[http://interfacemindbraincomputer.wetpaint.com/page/2.A.3.-](http://interfacemindbraincomputer.wetpaint.com/page/2.A.3.-Interface%2FInterfaz+MenteCerebro+M%C3%A1quina,+Computadora+u+Ordenador+%28Brain+Computer+Interface%29)

Interface%2FInterfaz+MenteCerebro+M%C3%A1quina,+Computadora+u+Ordenador+%28Brain+Computer+Interface%29

Sarabia, J.M., Pascual, M. (2007). Curso básico de estadística para Economía y Administración de empresas. Recuperado en Agosto, 2013 de:
http://books.google.com.mx/books?id=QEp1dROP0OAC&pg=PA70&dq=distribucion+asimetrica+negativa+y+positiva&hl=es&sa=X&ei=wHIJUtjEMYjE2gWQ_ICwCQ&redir_esc=y#v=onepage&q=distribucion%20asimetrica%20negativa%20y%20positiva&f=false

Sell, E.(2007). *Resonancia magnética funcional*.
Recuperado en Junio, 2011 de:
http://www.medicinabuenosaires.com/revistas/vol67-07/n6-1/v67_6-1_p661_664_.pdf

Soriano Mas, C., Guillazo Blanch, G., Redolar Ripoll, D.A., Torras García, M., Vale Martínez, A. (2007), *Fundamentos de Neurociencia*. Editorial UOC.

Sörnmo, L., Laguna, P., (2005) *Bioelectrical signal processing in cardiac and neurological applications*. Burlington, MA USA: Elsevier Academic Press, pp. 286-312

Stangor, Ch.,(2010). *Introduction to Psychology*. Flat World Knowledge
Recuperado en Marzo, 2011 de: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Sucholeiki, R, Louis,S.(2010). *Normal EEG Waveform.eMedicine from WebMD*.
Disponible en: <http://emedicine.medscape.com/article/1139332-overview>

Sweller, J., van Merriënboer, J., Pass, F. (1998). *Cognitive architecture and instructional design*.
Recuperado en Julio, 2011 de:
<http://www.csuchico.edu/~nswartz/Sweller%20van%20Merrienboer%20and%20Pass%201998.pdf>

Tan,D., y Nijholt, A., *Brain-Computer Interfaces and Human-Computer Interaction*.
Disponible en: <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/desney/publications/BCIHCI-Chapter1.pdf>

TBI Law. The Brain Injury Law Group. *About Brain Injury: A guide to Brain Anatomy*.
Recuperado en Agosto, 2010 de <http://www.waiting.com/frontallobe.html#anchor266669>

Teplan, M. (2002). *Fundamentals of EEG measurement*. Measurement science review, Volume 2, Section 2, 2002. Recuperado en Junio, 2011 de:
http://www.socal-diybio.org/files/9/92/Fundamentals_of_eeg_measurement.pdf

The brain from top to bottom.
Recuperado en Junio, 2011 de: <http://thebrain.mcgill.ca/>

The University of Chicago, Medical Center, (2010). *Anatomía del encéfalo*.
Recuperado en Agosto, 2010 de <http://www.ruf.rice.edu/~lngbrain/cglidden/telen.html>

Tovar Franco, J.A., (2001). *Neurobioquímica*. Programa de Posgrado. Pontificia Universidad Javeriana.
Recuperado en Septiembre, 2010 de
<http://www.javeriana.edu.co/Facultades/Ciencias/neurobioquimica/libros/inicio2003.html>

Troikatronix, (2008). *Isadora*.

Recuperado en Abril, 2011 de: <http://www.troikatronix.com/isadora.html>
UAB, (2001). MASTER en NEUROPSICOLOGÍA: *Diagnóstico y Rehabilitación Neuropsicológica*.
Universitat Autònoma de Barcelona, Departament de Medicina.
Recuperado en Julio, 2011 de: <http://www.neuropsicol.org/Np/atencion.htm>

Universidad de Castilla-La Mancha (s.f.). *El servomotor*. Robótica. Recuperado en Abril, 2011 de:
<http://www.info-ab.uclm.es/labelec/solar/electronica/elementos/servomotor.htm>

Vimal,R.L.P,(2008).*Attention and Emotion*
Recuperado en Julio, 2011 de:
<http://arbs.biblioteca.unesp.br/index.php/arbs/article/view/1806-8774.2008.v10p84/98>

Wang, S. Enhancing Brain-computer Interfacing through Advanced Independent Component Analysis techniques. Southampton, Marzo, 2009. 287 h.Trabajo de grado (Doctorado). University of Southampton, Faculty of Engineering,Science and Mathematics.
Disponible en: <http://ukpmc.ac.uk/theses/ETH/496016>

WebTaller, (s.f.).¿Qué significa Open Source?
Disponible en: <http://www.webtaller.com/maletin/articulos/que-significa-open-source.php>

Whelan, R., (2006). *Neuroimaging of cognitive load in instructional multimedia*.
Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1747938X06000480>

ENLACES ADICIONALES:

Pontificia Universidad Javeriana. Curso de Neurobioquímica, Jairo Alfonso Tovar Franco. Bogotá, Colombia.
<http://www.javeriana.edu.co/Facultades/Ciencias/neurobioquimica/libros/neurobioquimica/clasesneuron.htm>

Anatomy and functional areas of the brain. Medical legal art.
Recuperado en Agosto, 2010 de: <http://www.youtube.com/watch?v=HVGIfcP3ATI>

Doctissimo.Diccionario médico.
Recuperado en Junio, 2011 de: <http://salud.doctissimo.es/diccionario-medico/radioisotopo.html>

Country wise list of BCI Labs & Research Groups
<http://braincomputerinterface.weebly.com/other-bci-researchers-and-labs.html>

Neurosky: <http://www.neurosky.com/>

OCZ Technology: <http://www.ocztechnology.com/nia-game-controller.html>

Advanced Brain Monitoring <http://www.b-alert.com>

Emotiv: <http://emotiv.com/developer/SDK/UserManual.pdf>

Mynd MR de la compañía NeuroFocus
<http://www.fastcompany.com/1741403/mynd-neuromarketing-ipad-iphone-neurofocus-brain-scan>.

Arduino

<http://arduino.cc/en/>

Processing

<http://processing.org/>

R

<http://www.r-project.org/>

Venables, W.N., Smith, D.M., R Core Team (2013). An Introduction to R.

<http://cran.r-project.org/doc/manuals/R-intro.pdf>

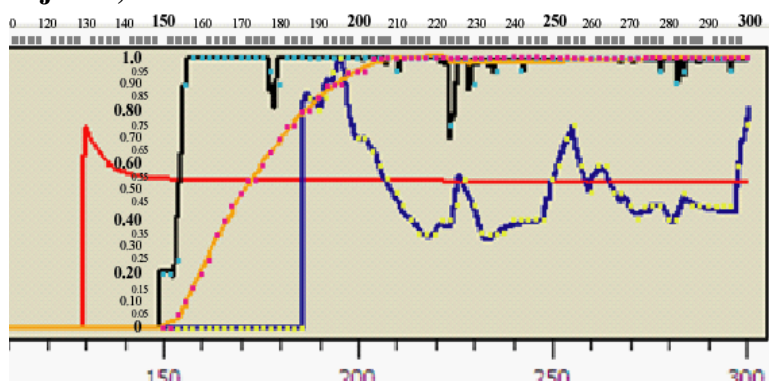
ANEXO A

ANEXO A

Los datos recolectados durante el experimento se presentan a continuación: cada sujeto participante presentó cuatro pruebas (laberintos). Las gráficas muestran las mediciones registradas en cada uno de ellos, en donde la línea azul con puntos amarillos representa la frustración, la línea amarilla-naranja con puntos rojos corresponde al entusiasmo de largo plazo, mientras que la línea negra con puntos color azul representa el entusiasmo instantáneo. Cada prueba lleva el análisis estadístico de los datos cuantitativos obtenidos (mínimo, máximo, primer y tercer cuartiles, media y mediana) de las variables frustración (f), entusiasmo instantáneo (ie) y entusiasmo de largo plazo (Lte). En algunos casos se pudo recolectar una variable adicional: la atención dirigida (EB) representada por la línea roja, pero la interferencia ambiental en la transmisión inalámbrica de la señal impidió que esta variable pudiera ser registrada en todos los casos.

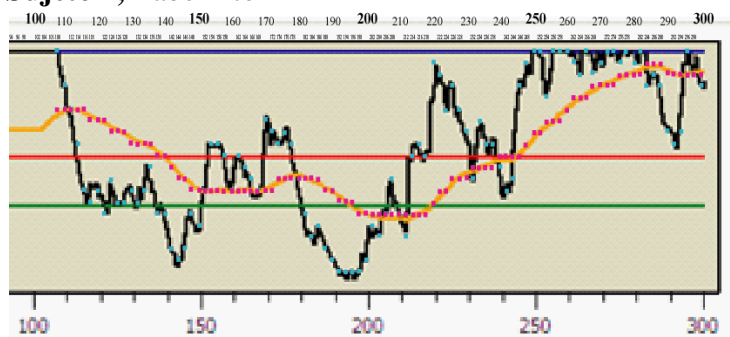
SUJETO 1

Sujeto 1, Laberinto A



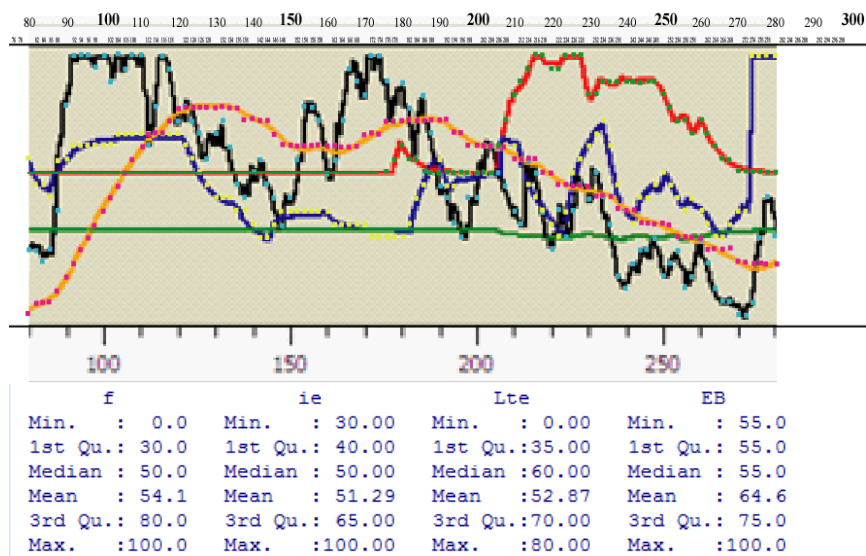
f	ie	Lte
Min. : 0.00	Min. : 20.0	Min. : 0.00
1st Qu.: 26.25	1st Qu.:100.0	1st Qu.: 80.00
Median : 45.00	Median :100.0	Median :100.00
Mean : 39.61	Mean : 95.6	Mean : 84.21
3rd Qu.: 55.00	3rd Qu.:100.0	3rd Qu.:100.00
Max. :100.00	Max. :100.0	Max. :100.00

Sujeto 1, Laberinto B

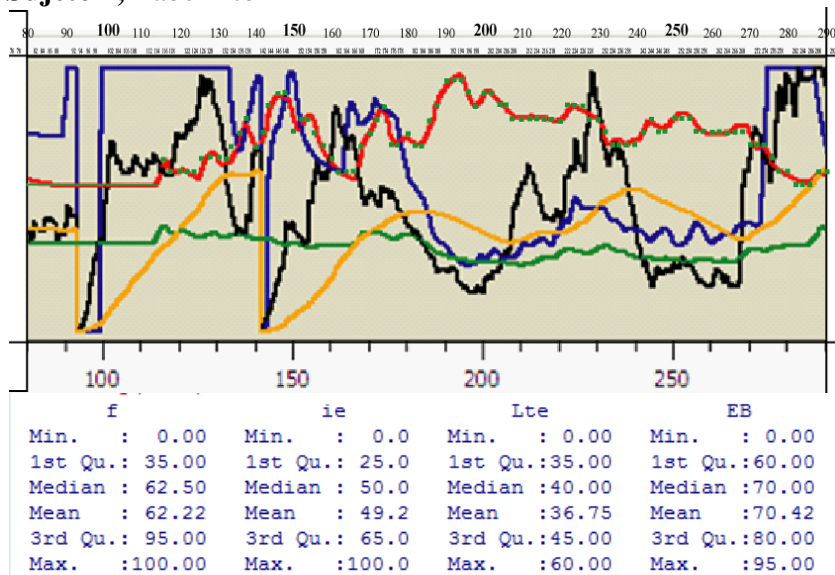


f	ie	Lte
Min. :100	Min. : 5.00	Min. :30.00
1st Qu.:100	1st Qu.: 35.00	1st Qu.:40.00
Median :100	Median : 60.00	Median :50.00
Mean :100	Mean : 57.53	Mean :57.01
3rd Qu.:100	3rd Qu.: 85.00	3rd Qu.:75.00
Max. :100	Max. :100.00	Max. :95.00

Sujeto 1, Laberinto C

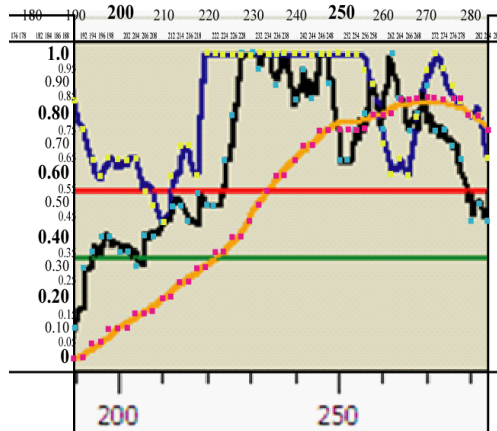


Sujeto 1, Laberinto D



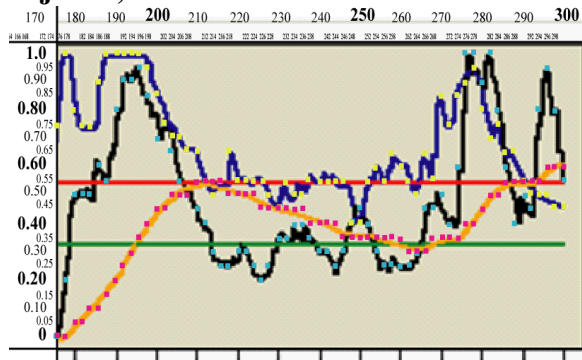
SUJETO 2

Sujeto 2, Laberinto A



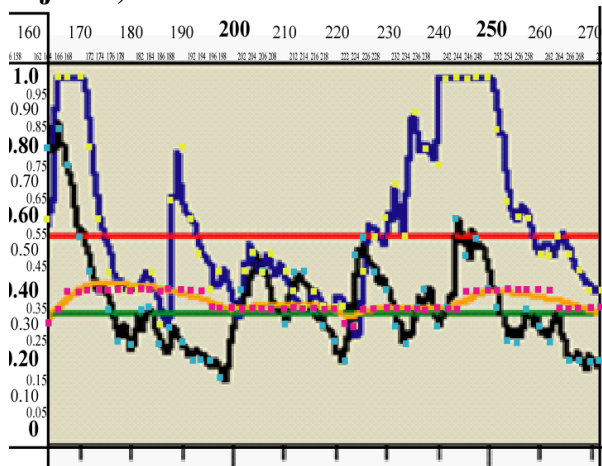
f	ie	Lte
Min. : 45.0	Min. : 10.00	Min. : 0.00
1st Qu.: 65.0	1st Qu.: 45.00	1st Qu.: 23.75
Median : 87.5	Median : 65.00	Median : 60.00
Mean : 82.6	Mean : 64.17	Mean : 51.35
3rd Qu.: 100.0	3rd Qu.: 85.00	3rd Qu.: 80.00
Max. : 100.0	Max. : 100.00	Max. : 85.00

Sujeto 2, Laberinto B



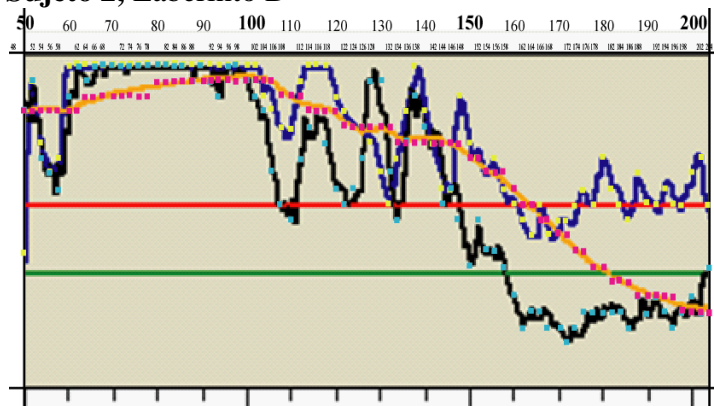
f	ie	Lte
Min. : 40.00	Min. : 0.00	Min. : 0.00
1st Qu.: 55.00	1st Qu.: 30.00	1st Qu.: 35.00
Median : 60.00	Median : 45.00	Median : 40.00
Mean : 66.19	Mean : 49.76	Mean : 39.29
3rd Qu.: 75.00	3rd Qu.: 62.50	3rd Qu.: 50.00
Max. : 100.00	Max. : 100.00	Max. : 60.00

Sujeto 2, Laberinto C



f	ie	Lte
Min. : 30.00	Min. : 15.00	Min. : 30.00
1st Qu.: 40.00	1st Qu.: 25.00	1st Qu.: 35.00
Median : 50.00	Median : 35.00	Median : 35.00
Mean : 58.73	Mean : 36.45	Mean : 36.82
3rd Qu.: 72.50	3rd Qu.: 45.00	3rd Qu.: 40.00
Max. : 100.00	Max. : 85.00	Max. : 40.00

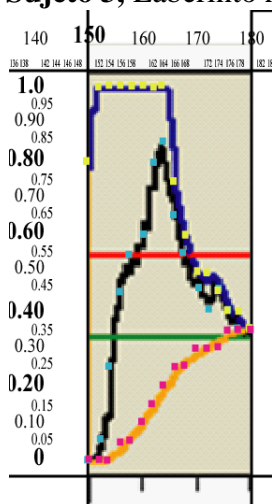
Sujeto 2, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. : 40.0	Min. : 10.00	Min. : 20.00
1st Qu.: 60.0	1st Qu.: 25.00	1st Qu.: 51.25
Median : 77.5	Median : 65.00	Median : 80.00
Mean : 77.7	Mean : 61.28	Mean : 70.19
3rd Qu.: 100.0	3rd Qu.: 95.00	3rd Qu.: 90.00
Max. : 100.0	Max. : 100.00	Max. : 95.00

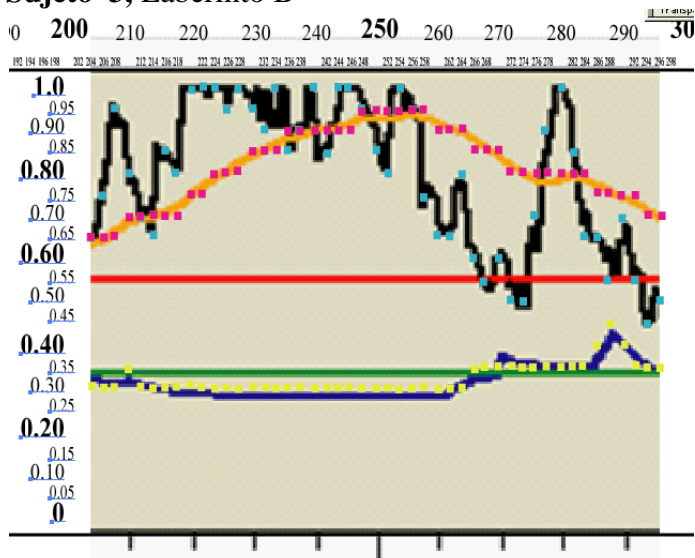
SUJETO 3

Sujeto 3, Laberinto A



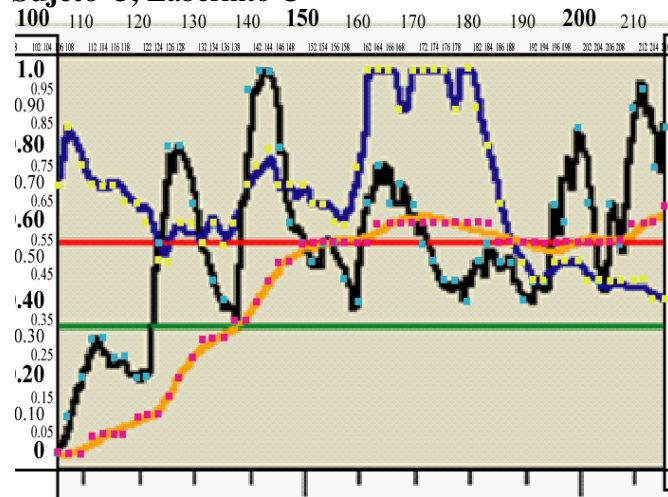
f	ie	Lte
Min. : 35.00	Min. : 0.00	Min. : 0.00
1st Qu.: 48.75	1st Qu.: 35.00	1st Qu.: 5.00
Median : 77.50	Median : 45.00	Median : 22.50
Mean : 73.44	Mean : 44.69	Mean : 18.75
3rd Qu.: 100.00	3rd Qu.: 56.25	3rd Qu.: 30.00
Max. : 100.00	Max. : 85.00	Max. : 35.00

Sujeto 3, Laberinto B



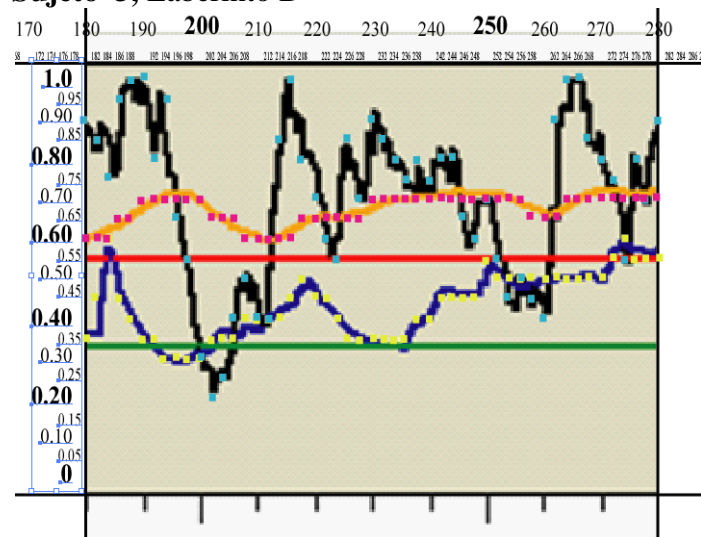
f	ie	Lte
Min. : 30.00	Min. : 45.00	Min. : 65.00
1st Qu.: 30.00	1st Qu.: 65.00	1st Qu.: 75.00
Median : 30.00	Median : 80.00	Median : 80.00
Mean : 32.23	Mean : 79.15	Mean : 81.38
3rd Qu.: 35.00	3rd Qu.: 95.00	3rd Qu.: 90.00
Max. : 45.00	Max. : 100.00	Max. : 95.00

Sujeto 3, Laberinto C



f	ie	lte
Min. : 40.00	Min. : 0.00	Min. : 0.00
1st Qu.: 50.00	1st Qu.: 43.75	1st Qu.: 30.00
Median : 65.00	Median : 55.00	Median : 55.00
Mean : 66.96	Mean : 54.73	Mean : 42.95
3rd Qu.: 76.25	3rd Qu.: 65.00	3rd Qu.: 60.00
Max. : 100.00	Max. : 100.00	Max. : 65.00

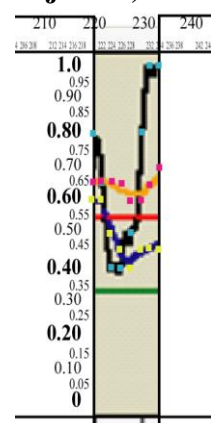
Sujeto 3, Laberinto D



f	ie	lte
Min. : 30.00	Min. : 20.00	Min. : 60.00
1st Qu.: 35.00	1st Qu.: 55.00	1st Qu.: 65.00
Median : 45.00	Median : 75.00	Median : 70.00
Mean : 43.33	Mean : 70.39	Mean : 67.06
3rd Qu.: 50.00	3rd Qu.: 85.00	3rd Qu.: 70.00
Max. : 60.00	Max. : 100.00	Max. : 70.00

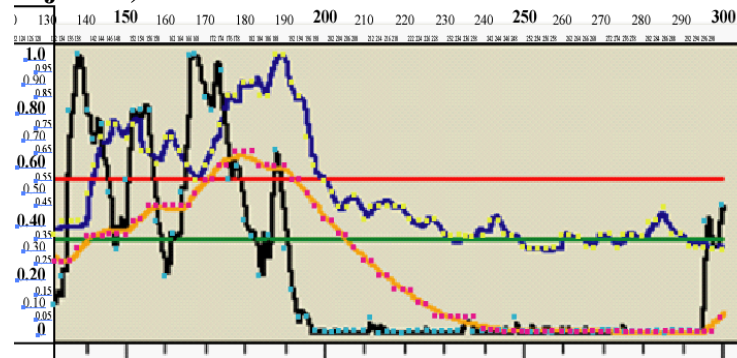
SUJETO 4

Sujeto 4, Laberinto A



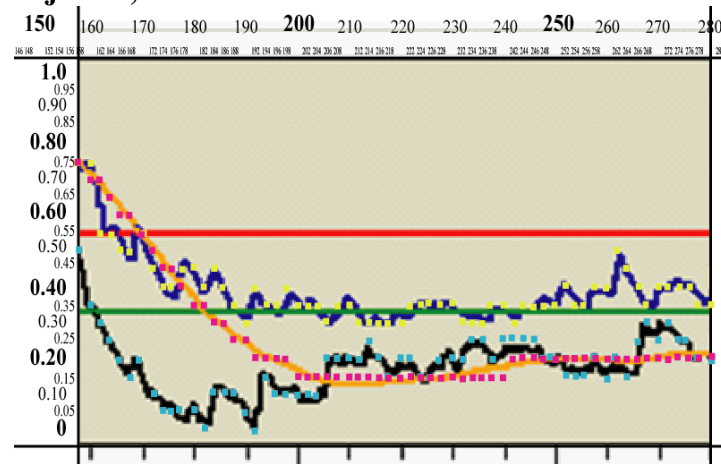
f	ie	lte
Min. : 40.00	Min. : 40.00	Min. : 60.00
1st Qu.: 45.00	1st Qu.: 47.50	1st Qu.: 63.75
Median : 45.00	Median : 72.50	Median : 65.00
Mean : 48.75	Mean : 69.38	Mean : 64.38
3rd Qu.: 52.50	3rd Qu.: 85.00	3rd Qu.: 65.00
Max. : 60.00	Max. : 100.00	Max. : 70.00

Sujeto 4, Laberinto B



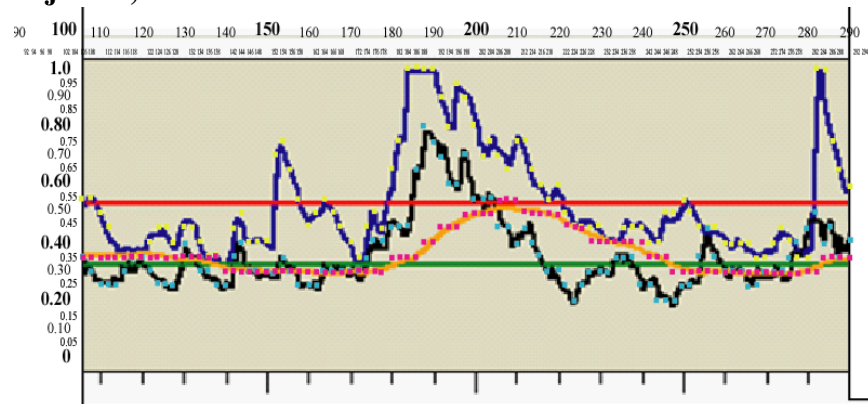
f	ie	Lte
Min. : 30.00	Min. : 0.00	Min. : 0
1st Qu.: 35.00	1st Qu.: 0.00	1st Qu.: 0
Median : 40.00	Median : 0.00	Median : 20
Mean : 50.12	Mean : 22.53	Mean : 23
3rd Qu.: 65.00	3rd Qu.: 40.00	3rd Qu.: 45
Max. : 100.00	Max. : 100.00	Max. : 65

Sujeto 4, Laberinto C



f	ie	Lte
Min. : 30.00	Min. : 0.00	Min. : 15.00
1st Qu.: 35.00	1st Qu.: 11.25	1st Qu.: 15.00
Median : 35.00	Median : 20.00	Median : 20.00
Mean : 39.03	Mean : 18.06	Mean : 26.05
3rd Qu.: 40.00	3rd Qu.: 25.00	3rd Qu.: 25.00
Max. : 75.00	Max. : 50.00	Max. : 75.00

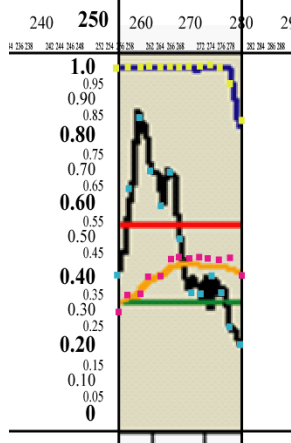
Sujeto 4, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. : 30.00	Min. : 20.0	Min. : 30.00
1st Qu.: 40.00	1st Qu.: 30.0	1st Qu.: 30.00
Median : 45.00	Median : 30.0	Median : 35.00
Mean : 53.98	Mean : 35.7	Mean : 36.18
3rd Qu.: 65.00	3rd Qu.: 40.0	3rd Qu.: 40.00
Max. : 100.00	Max. : 80.0	Max. : 55.00

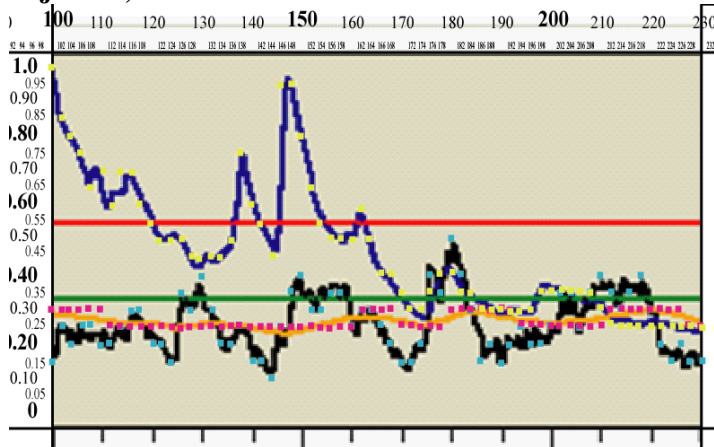
SUJETO 5

Sujeto 5, Laberinto A



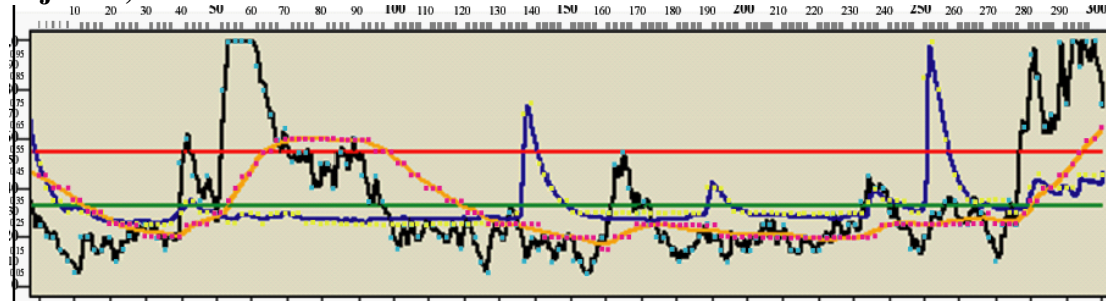
f	ie	Lte
Min. : 85.00	Min. : 20.00	Min. : 30.00
1st Qu.: 100.00	1st Qu.: 35.00	1st Qu.: 40.00
Median : 100.00	Median : 40.00	Median : 45.00
Mean : 98.46	Mean : 48.46	Mean : 41.15
3rd Qu.: 100.00	3rd Qu.: 65.00	3rd Qu.: 45.00
Max. : 100.00	Max. : 85.00	Max. : 45.00

Sujeto 5, Laberinto B



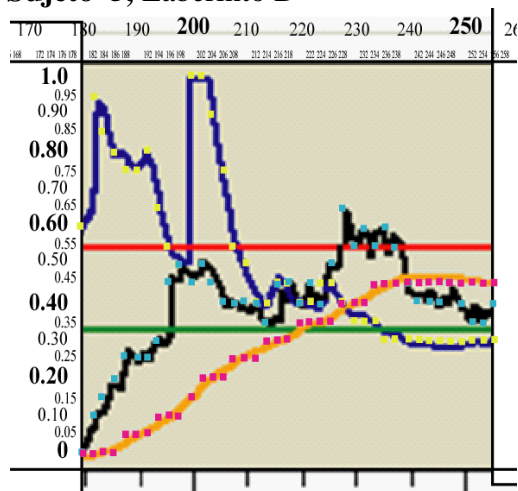
f	ie	Lte
Min. : 25.00	Min. : 10.00	Min. : 25.00
1st Qu.: 30.00	1st Qu.: 20.00	1st Qu.: 25.00
Median : 42.50	Median : 25.00	Median : 25.00
Mean : 46.74	Mean : 26.06	Mean : 26.89
3rd Qu.: 58.75	3rd Qu.: 33.75	3rd Qu.: 30.00
Max. : 100.00	Max. : 50.00	Max. : 30.00

Sujeto 5, Laberinto C



f	ie	Lte
Min. : 25.00	Min. : 5.00	Min. : 15.00
1st Qu.: 25.00	1st Qu.: 20.00	1st Qu.: 20.00
Median : 30.00	Median : 25.00	Median : 25.00
Mean : 32.93	Mean : 34.08	Mean : 32.11
3rd Qu.: 35.00	3rd Qu.: 45.00	3rd Qu.: 40.00
Max. : 100.00	Max. : 100.00	Max. : 65.00

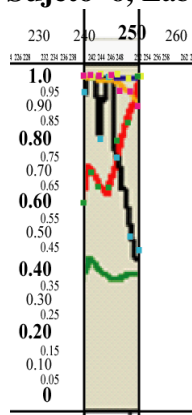
Sujeto 5, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. : 30.00	Min. : 0.00	Min. : 0.00
1st Qu.: 30.00	1st Qu.:35.00	1st Qu.:12.50
Median : 45.00	Median :40.00	Median :30.00
Mean : 51.41	Mean :39.87	Mean :27.82
3rd Qu.: 70.00	3rd Qu.:45.00	3rd Qu.:45.00
Max. :100.00	Max. :65.00	Max. :45.00

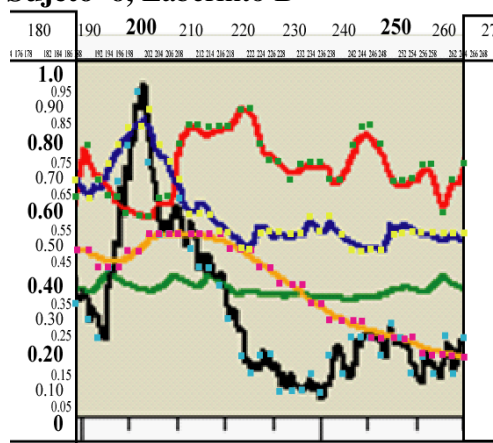
SUJETO 6

Sujeto 6, Laberinto A



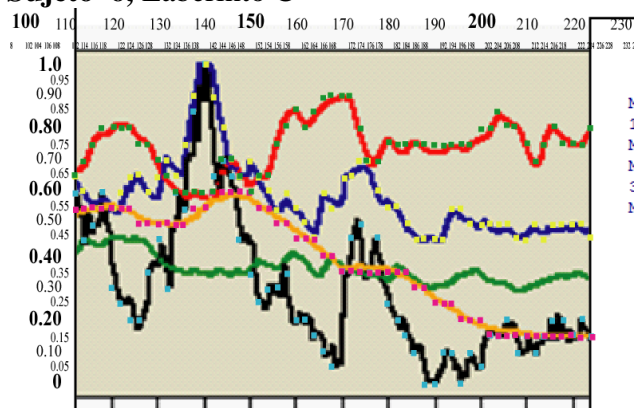
f	ie	Lte	EB
Min. :100	Min. : 45.00	Min. : 90.00	Min. : 60.0
1st Qu.:100	1st Qu.: 62.50	1st Qu.: 95.00	1st Qu.: 65.0
Median :100	Median : 80.00	Median :100.00	Median : 70.0
Mean :100	Mean : 77.86	Mean : 97.14	Mean : 75.0
3rd Qu.:100	3rd Qu.: 97.50	3rd Qu.:100.00	3rd Qu.: 82.5
Max. :100	Max. :100.00	Max. :100.00	Max. :100.0

Sujeto 6, Laberinto B



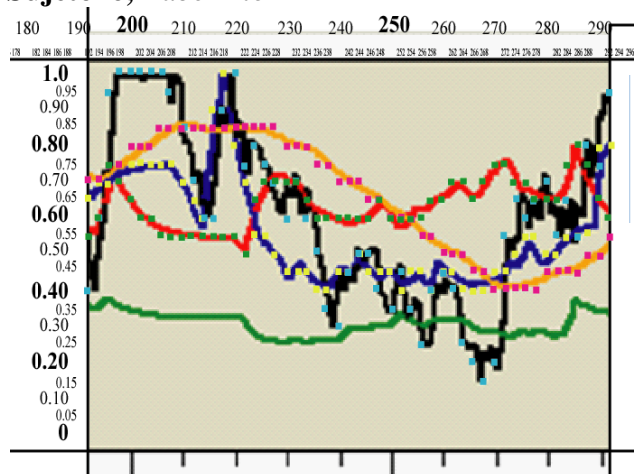
f	ie	Lte	EB
Min. :50.00	Min. :10.00	Min. :20.00	Min. :60.00
1st Qu.:55.00	1st Qu.:17.50	1st Qu.:27.50	1st Qu.:70.00
Median :55.00	Median :25.00	Median :45.00	Median :75.00
Mean :61.03	Mean :32.56	Mean :39.74	Mean :74.36
3rd Qu.:67.50	3rd Qu.:45.00	3rd Qu.:50.00	3rd Qu.:80.00
Max. :90.00	Max. :95.00	Max. :55.00	Max. :90.00

Sujeto 6, Laberinto C



f	ie	Lte	EB
Min. : 45.00	Min. : 0.00	Min. :15.00	Min. :60.00
1st Qu.: 50.00	1st Qu.: 15.00	1st Qu.:20.00	1st Qu.:70.00
Median : 55.00	Median : 20.00	Median :40.00	Median :75.00
Mean : 58.68	Mean : 29.74	Mean :38.16	Mean :74.65
3rd Qu.: 65.00	3rd Qu.: 45.00	3rd Qu.:55.00	3rd Qu.:80.00
Max. :100.00	Max. :100.00	Max. :60.00	Max. :90.00

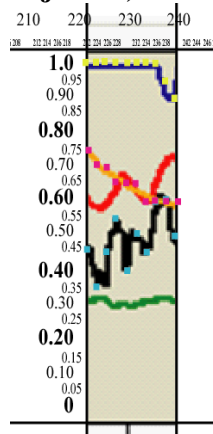
Sujeto 6, Laberinto D



f	ie	Lte	EB
Min. : 40.00	Min. : 15.00	Min. :40.00	Min. :50.00
1st Qu.: 45.00	1st Qu.: 42.50	1st Qu.:50.00	1st Qu.:60.00
Median : 50.00	Median : 60.00	Median :70.00	Median :65.00
Mean : 56.76	Mean : 61.37	Mean :65.59	Mean :63.82
3rd Qu.: 70.00	3rd Qu.: 77.50	3rd Qu.:80.00	3rd Qu.:70.00
Max. :100.00	Max. :100.00	Max. :85.00	Max. :80.00

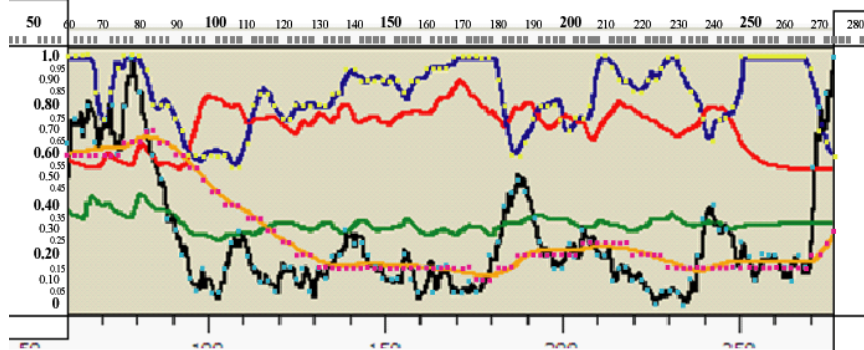
SUJETO 7

Sujeto 7, Laberinto A



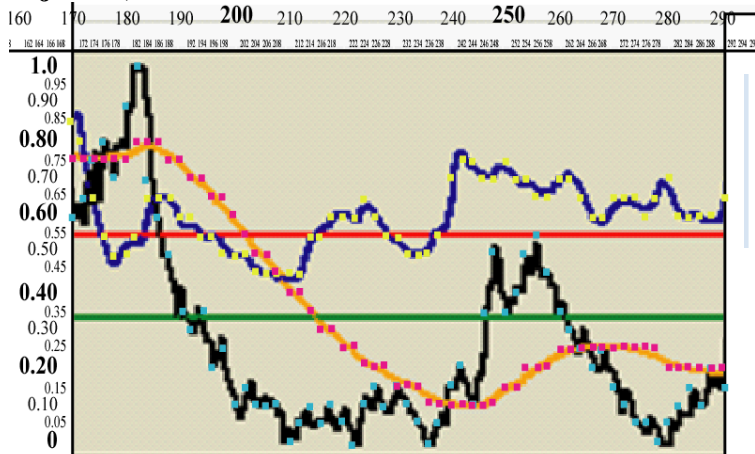
f	ie	Lte
Min. : 90.0	Min. :35.00	Min. :60.00
1st Qu.:100.0	1st Qu.:45.00	1st Qu.:60.00
Median :100.0	Median :47.50	Median :65.00
Mean : 98.5	Mean :48.50	Mean :65.00
3rd Qu.:100.0	3rd Qu.:53.75	3rd Qu.:68.75
Max. :100.0	Max. :60.00	Max. :75.00

Sujeto 7, Laberinto B



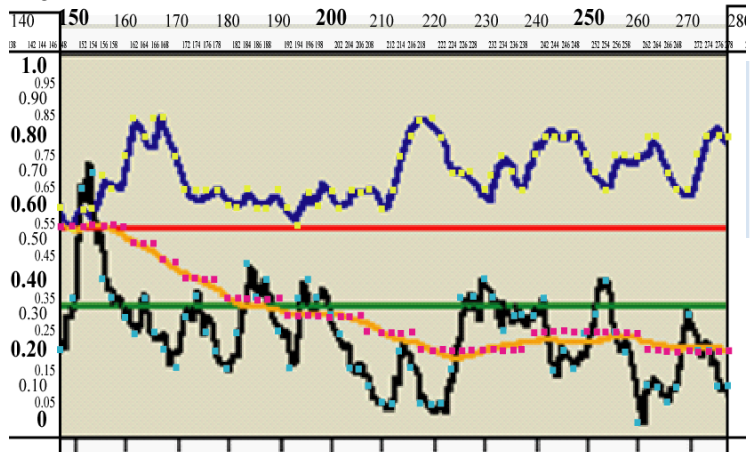
f	ie	Lte
Min. : 55.00	Min. : 0.00	Min. :10.00
1st Qu.: 75.00	1st Qu.: 10.00	1st Qu.:15.00
Median : 85.00	Median : 20.00	Median :20.00
Mean : 84.86	Mean : 26.85	Mean :27.45
3rd Qu.: 96.25	3rd Qu.: 30.00	3rd Qu.:35.00
Max. :100.00	Max. :100.00	Max. :70.00

Sujeto 7, Laberinto C



f	ie	Lte
Min. :45.00	Min. : 0.00	Min. :10.00
1st Qu.:55.00	1st Qu.: 10.00	1st Qu.:20.00
Median :60.00	Median : 15.00	Median :25.00
Mean :60.57	Mean : 26.64	Mean :36.56
3rd Qu.:65.00	3rd Qu.: 35.00	3rd Qu.:60.00
Max. :85.00	Max. :100.00	Max. :80.00

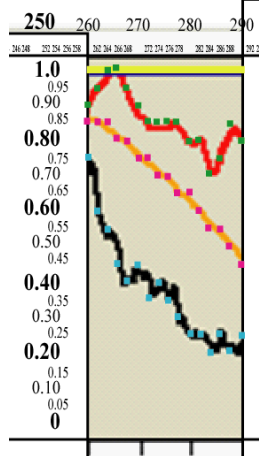
Sujeto 7, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. :55.00	Min. : 0.00	Min. :20.00
1st Qu.:65.00	1st Qu.:15.00	1st Qu.:20.00
Median :70.00	Median :25.00	Median :25.00
Mean :70.23	Mean :24.47	Mean :30.83
3rd Qu.:78.75	3rd Qu.:35.00	3rd Qu.:35.00
Max. :85.00	Max. :70.00	Max. :55.00

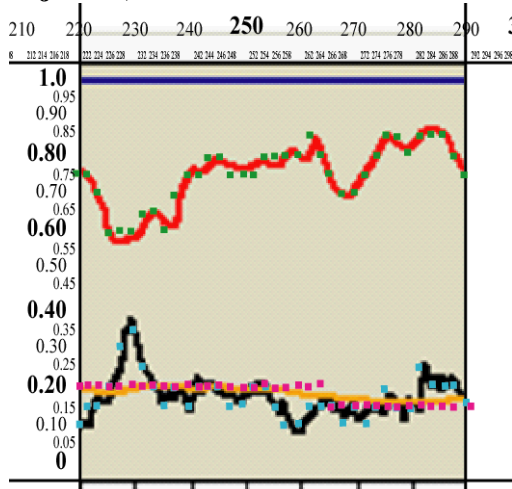
SUJETO 8

Sujeto 8, Laberinto A



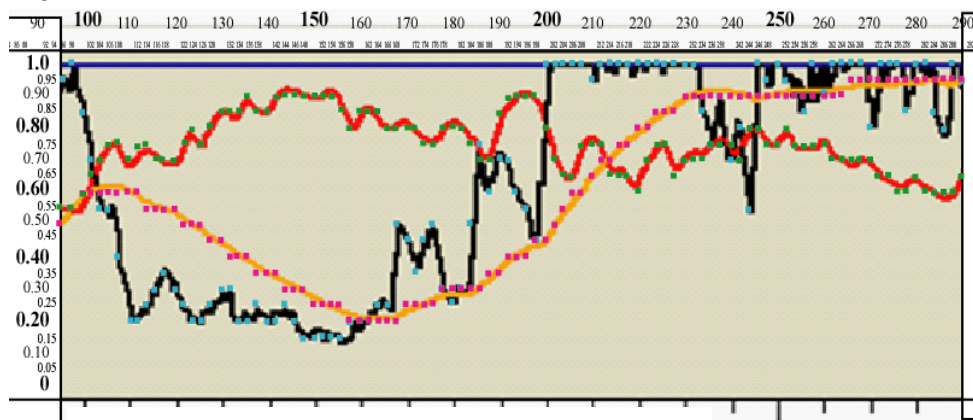
f	ie	Lte	EB
Min. :100	Min. :20.0	Min. :45.00	Min. : 70.00
1st Qu.:100	1st Qu.:25.0	1st Qu.:58.75	1st Qu.: 80.00
Median :100	Median :35.0	Median :70.00	Median : 85.00
Mean :100	Mean :37.5	Mean :68.75	Mean : 86.25
3rd Qu.:100	3rd Qu.:45.0	3rd Qu.:80.00	3rd Qu.: 91.25
Max. :100	Max. :75.0	Max. :85.00	Max. :100.00

Sujeto 8, Laberinto B



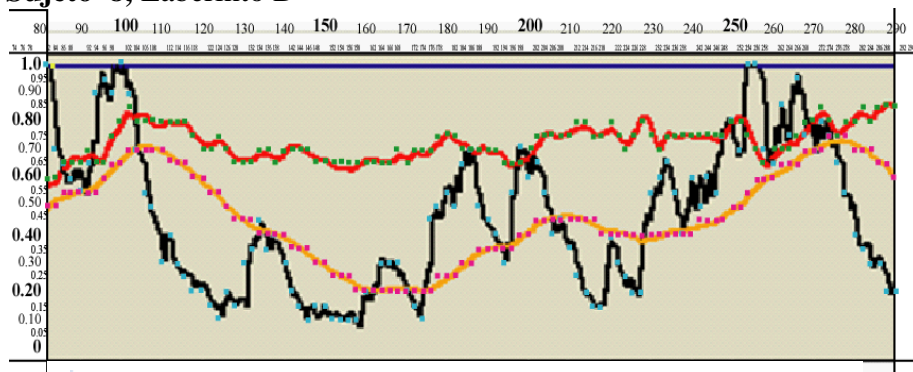
f	ie	Lte	EB
Min. :100	Min. :10.0	Min. :15.00	Min. :60.00
1st Qu.:100	1st Qu.:15.0	1st Qu.:15.00	1st Qu.:70.00
Median :100	Median :15.0	Median :20.00	Median :75.00
Mean :100	Mean :17.5	Mean :18.19	Mean :75.28
3rd Qu.:100	3rd Qu.:20.0	3rd Qu.:20.00	3rd Qu.:80.00
Max. :100	Max. :35.0	Max. :20.00	Max. :85.00

Sujeto 8, Laberinto C



f	ie	Lte	EB
Min. :100	Min. : 15.00	Min. :20.0	Min. :55.0
1st Qu.:100	1st Qu.: 26.25	1st Qu.:35.0	1st Qu.:70.0
Median :100	Median : 70.00	Median :60.0	Median :75.0
Mean :100	Mean : 63.98	Mean :60.2	Mean :74.9
3rd Qu.:100	3rd Qu.:100.00	3rd Qu.:90.0	3rd Qu.:80.0
Max. :100	Max. :100.00	Max. :95.0	Max. :90.0

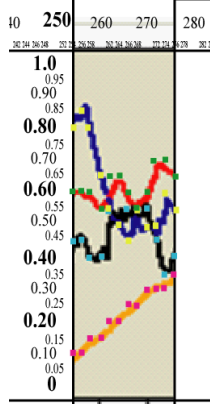
Sujeto 8, Laberinto D



f	ie	Lte	EB
Min. :100	Min. : 10.00	Min. :20.00	Min. :60.00
1st Qu.:100	1st Qu.: 20.00	1st Qu.:35.00	1st Qu.:70.00
Median :100	Median : 45.00	Median :45.00	Median :75.00
Mean :100	Mean : 45.95	Mean :46.67	Mean :72.71
3rd Qu.:100	3rd Qu.: 65.00	3rd Qu.:60.00	3rd Qu.:75.00
Max. :100	Max. :100.00	Max. :75.00	Max. :85.00

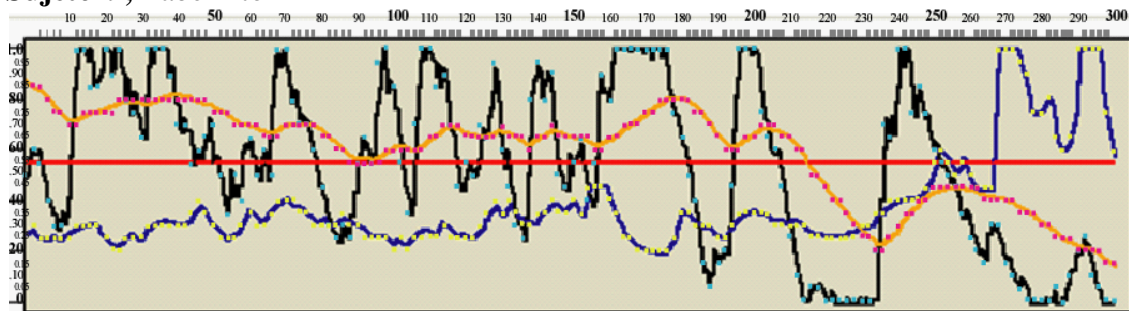
SUJETO 9

Sujeto 9, Laberinto A



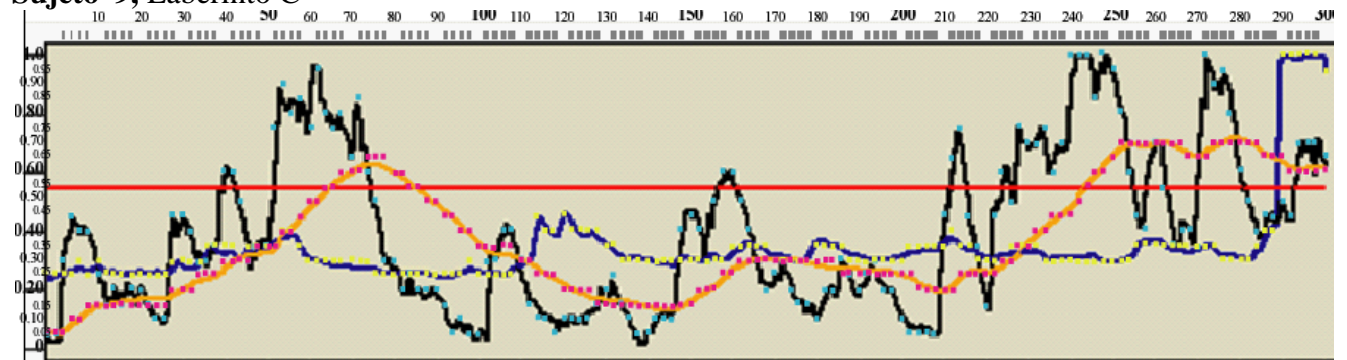
f	ie	Lte	EB
Min. :45.00	Min. :35.00	Min. :10.00	Min. :55.00
1st Qu.:50.00	1st Qu.:40.00	1st Qu.:15.00	1st Qu.:60.00
Median :55.00	Median :45.00	Median :22.50	Median :60.00
Mean :60.83	Mean :46.67	Mean :22.08	Mean :62.08
3rd Qu.:68.75	3rd Qu.:55.00	3rd Qu.:30.00	3rd Qu.:65.00
Max. :85.00	Max. :55.00	Max. :35.00	Max. :70.00

Sujeto 9, Laberinto B



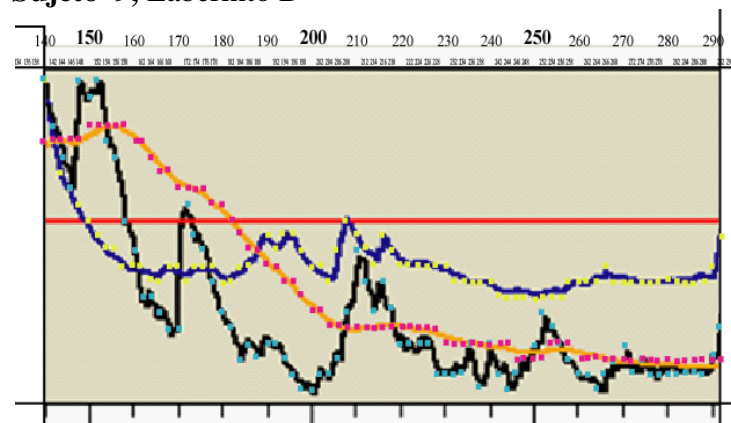
f	ie	Lte
Min. : 20.00	Min. : 0.0	Min. :15.00
1st Qu.: 25.00	1st Qu.: 25.0	1st Qu.:45.00
Median : 30.00	Median : 55.0	Median :65.00
Mean : 37.75	Mean : 54.2	Mean :59.07
3rd Qu.: 40.00	3rd Qu.: 82.5	3rd Qu.:70.00
Max. :100.00	Max. :100.0	Max. :85.00

Sujeto 9, Laberinto C



f	ie	Lte
Min. : 25.0	Min. : 0.0	Min. : 5.00
1st Qu.: 30.0	1st Qu.: 20.0	1st Qu.: 20.00
Median : 30.0	Median : 35.0	Median : 30.00
Mean : 34.6	Mean : 39.9	Mean : 36.72
3rd Qu.: 35.0	3rd Qu.: 60.0	3rd Qu.: 55.00
Max. : 100.0	Max. : 100.0	Max. : 70.00

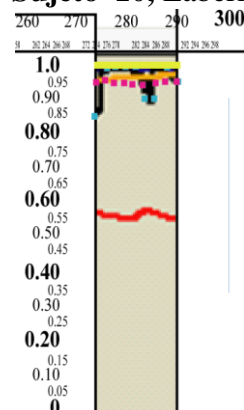
Sujeto 9, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. : 30.00	Min. : 0.00	Min. : 10.00
1st Qu.: 35.00	1st Qu.: 5.00	1st Qu.: 10.00
Median : 40.00	Median : 15.00	Median : 20.00
Mean : 41.36	Mean : 24.81	Mean : 34.48
3rd Qu.: 45.00	3rd Qu.: 30.00	3rd Qu.: 60.00
Max. : 100.00	Max. : 100.00	Max. : 85.00

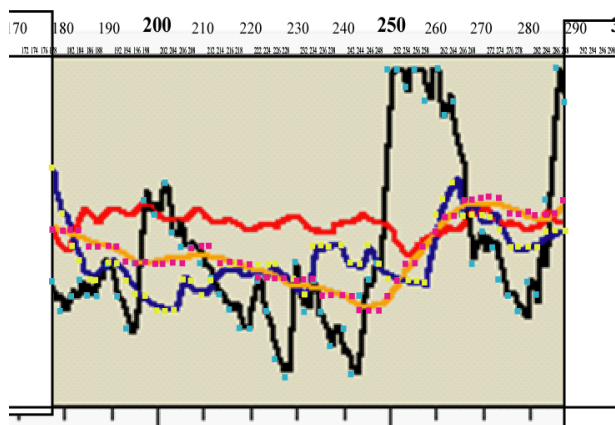
SUJETO 10

Sujeto 10, Laberinto A



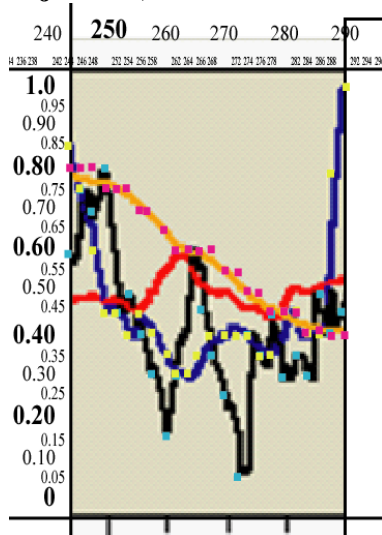
f	ie	Lte
Min. : 100	Min. : 85.00	Min. : 95
1st Qu.: 100	1st Qu.: 90.00	1st Qu.: 95
Median : 100	Median : 100.00	Median : 95
Mean : 100	Mean : 95.56	Mean : 95
3rd Qu.: 100	3rd Qu.: 100.00	3rd Qu.: 95
Max. : 100	Max. : 100.00	Max. : 95

Sujeto 10, Laberinto B



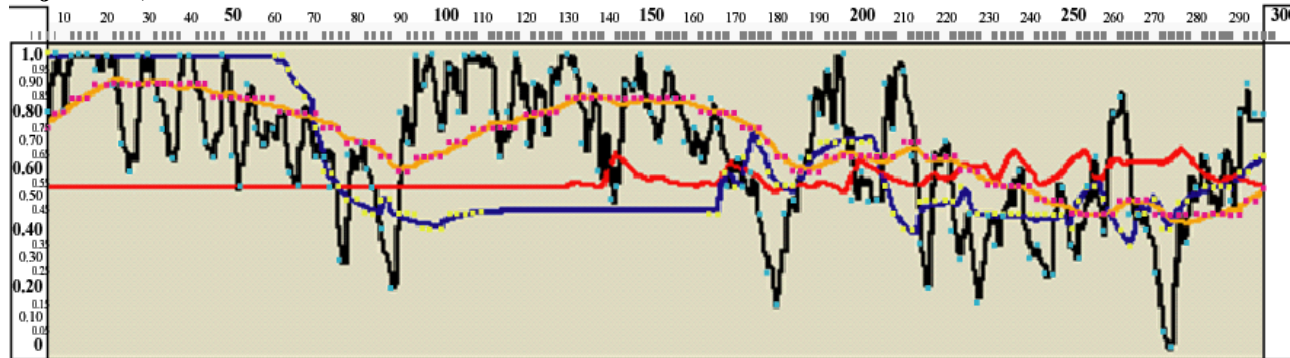
f	ie	Lte
Min. : 0.00	Min. : 5.00	Min. :25.00
1st Qu.:35.00	1st Qu.: 28.75	1st Qu.:35.00
Median :40.00	Median : 35.00	Median :40.00
Mean :40.62	Mean : 44.82	Mean :43.48
3rd Qu.:45.00	3rd Qu.: 55.00	3rd Qu.:51.25
Max. :65.00	Max. :100.00	Max. :60.00

Sujeto 10, Laberinto C



f	ie	Lte
Min. : 0.00	Min. : 5.00	Min. :40.00
1st Qu.: 35.00	1st Qu.:30.00	1st Qu.:45.00
Median : 40.00	Median :40.00	Median :60.00
Mean : 46.04	Mean :42.29	Mean :58.96
3rd Qu.: 45.00	3rd Qu.:50.00	3rd Qu.:71.25
Max. :100.00	Max. :80.00	Max. :80.00

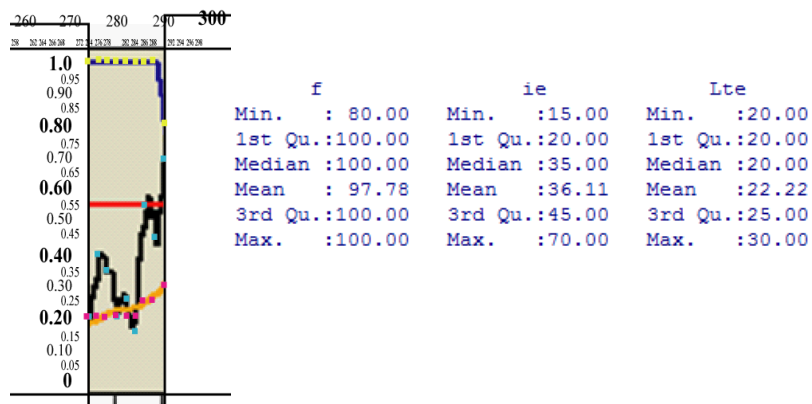
Sujeto 10, Laberinto D



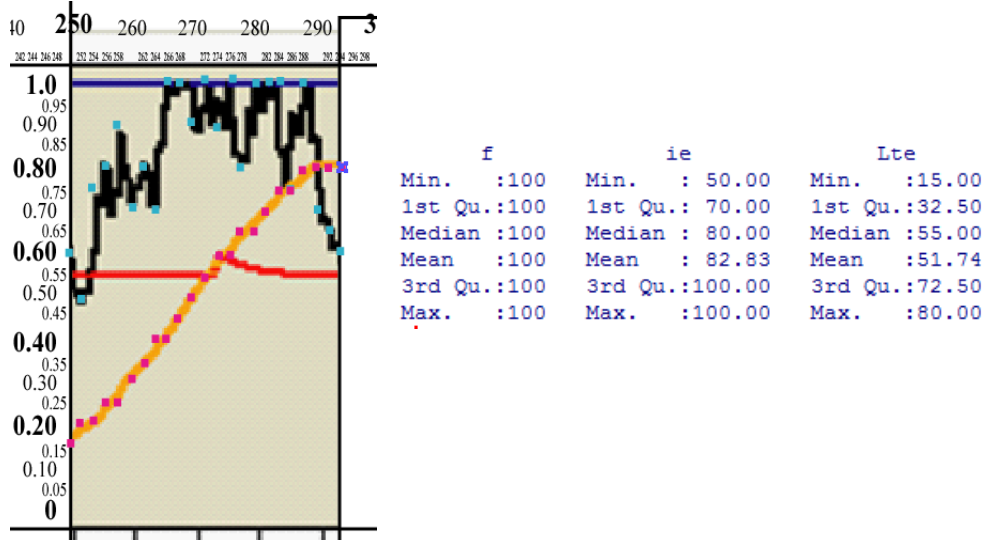
f	ie	Lte
Min. : 35.0	Min. : 0.00	Min. :45.00
1st Qu.: 45.0	1st Qu.: 50.00	1st Qu.:60.00
Median : 50.0	Median : 70.00	Median :70.00
Mean : 61.1	Mean : 67.23	Mean :69.97
3rd Qu.: 70.0	3rd Qu.: 88.75	3rd Qu.:85.00
Max. :100.0	Max. :100.00	Max. :90.00

SUJETO 11

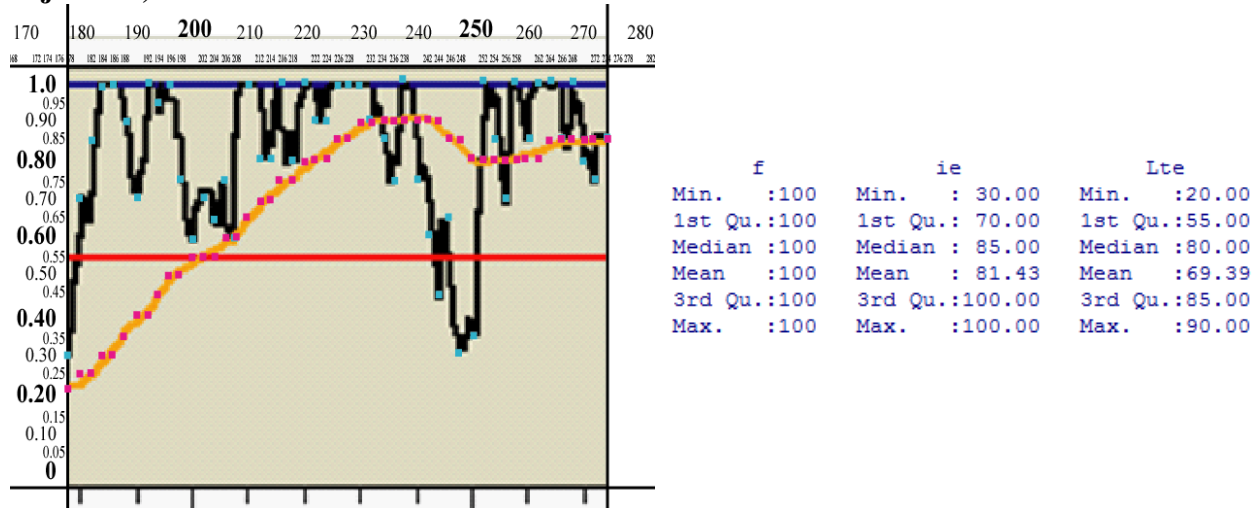
Sujeto 11, Laberinto A



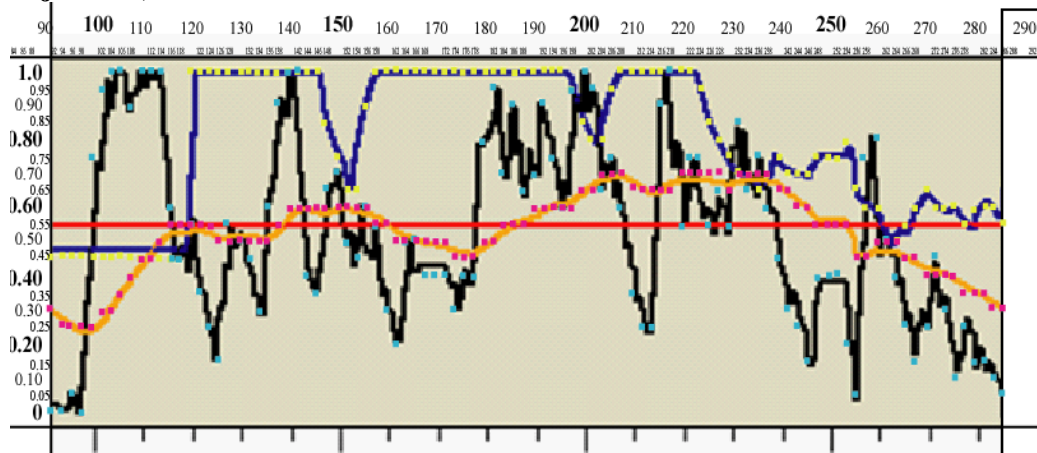
Sujeto 11, Laberinto B



Sujeto 11, Laberinto C



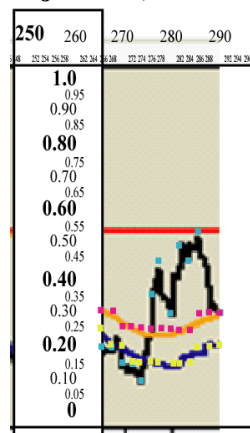
Sujeto 11, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. : 45.00	Min. : 0.00	Min. : 25.00
1st Qu.: 60.00	1st Qu.: 30.00	1st Qu.: 45.00
Median : 82.50	Median : 50.00	Median : 55.00
Mean : 79.39	Mean : 51.22	Mean : 52.76
3rd Qu.: 100.00	3rd Qu.: 75.00	3rd Qu.: 60.00
Max. : 100.00	Max. : 100.00	Max. : 70.00

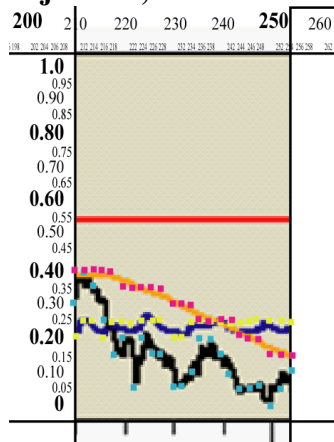
SUJETO 12

Sujeto 12, Laberinto A



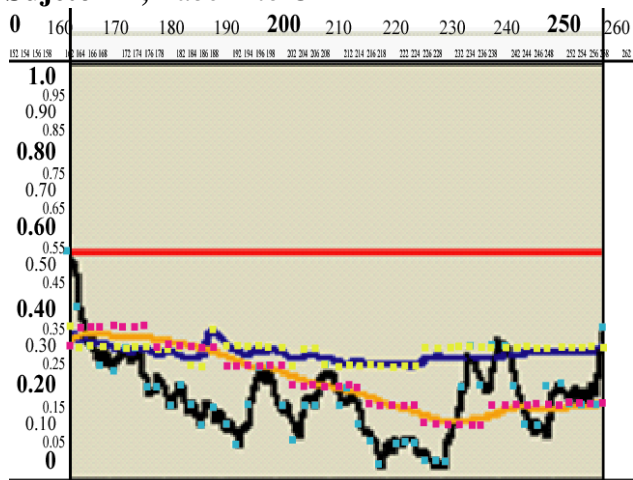
f	ie	Lte
Min. : 15.00	Min. : 10.00	Min. : 25.00
1st Qu.: 15.00	1st Qu.: 20.00	1st Qu.: 25.00
Median : 15.00	Median : 30.00	Median : 25.00
Mean : 17.69	Mean : 30.77	Mean : 26.92
3rd Qu.: 20.00	3rd Qu.: 45.00	3rd Qu.: 30.00
Max. : 25.00	Max. : 55.00	Max. : 30.00

Sujeto 12, Laberinto B



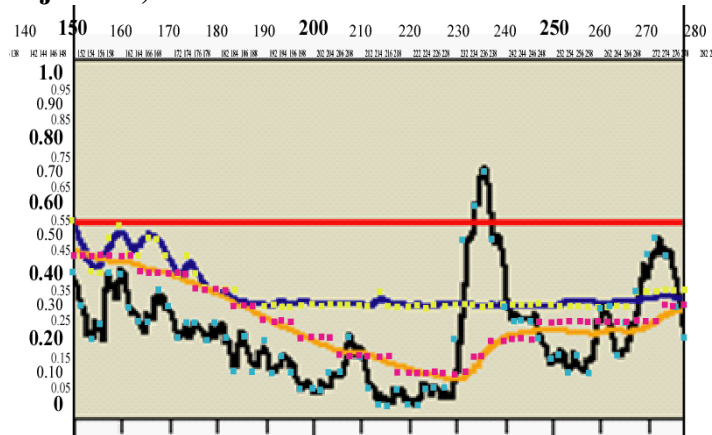
f	ie	Lte
Min. :20.00	Min. : 0.00	Min. :15.00
1st Qu.:25.00	1st Qu.: 5.00	1st Qu.:22.50
Median :25.00	Median :15.00	Median :30.00
Mean :24.13	Mean :14.57	Mean :29.13
3rd Qu.:25.00	3rd Qu.:20.00	3rd Qu.:35.00
Max. :25.00	Max. :40.00	Max. :40.00

Sujeto 12, Laberinto C



f	ie	Lte
Min. :25.00	Min. : 0.00	Min. :10.00
1st Qu.:30.00	1st Qu.:10.00	1st Qu.:15.00
Median :30.00	Median :15.00	Median :20.00
Mean :28.98	Mean :17.55	Mean :21.43
3rd Qu.:30.00	3rd Qu.:25.00	3rd Qu.:30.00
Max. :35.00	Max. :55.00	Max. :35.00

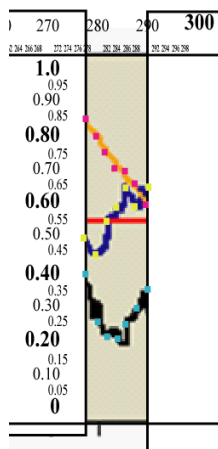
Sujeto 12, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. :30.00	Min. : 0.00	Min. :10
1st Qu.:30.00	1st Qu.:10.00	1st Qu.:20
Median :30.00	Median :20.00	Median :25
Mean :34.31	Mean :20.92	Mean :26
3rd Qu.:35.00	3rd Qu.:30.00	3rd Qu.:35
Max. :55.00	Max. :60.00	Max. :45

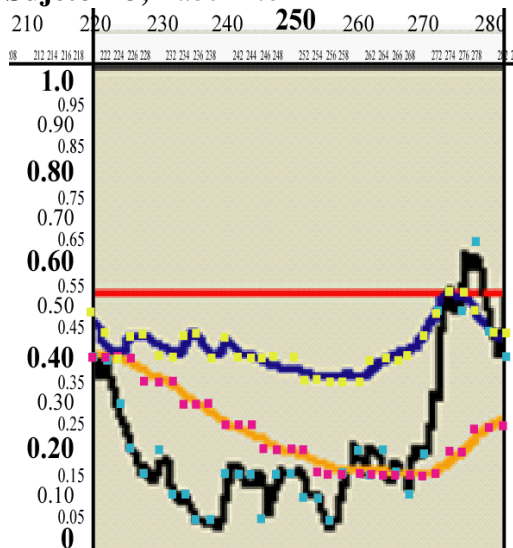
SUJETO 13

Sujeto 13, Laberinto A



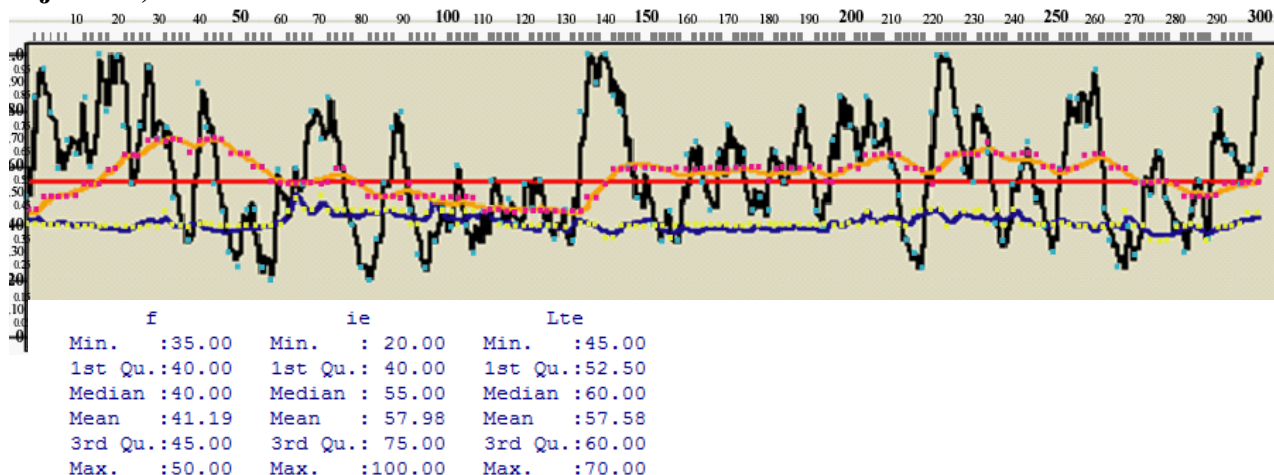
f	ie	Lte
Min. :45.00	Min. :20.00	Min. :60.00
1st Qu.:52.50	1st Qu.:22.50	1st Qu.:67.50
Median :60.00	Median :25.00	Median :70.00
Mean :57.14	Mean :27.86	Mean :72.14
3rd Qu.:62.50	3rd Qu.:32.50	3rd Qu.:77.50
Max. :65.00	Max. :40.00	Max. :85.00

Sujeto 13, Laberinto B

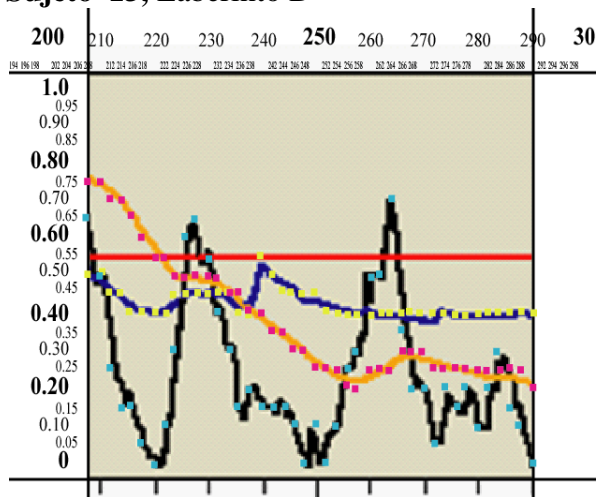


f	ie	Lte
Min. : 4.00	Min. : 5.0	Min. :15.00
1st Qu.:40.00	1st Qu.:10.0	1st Qu.:15.00
Median :40.00	Median :15.0	Median :22.50
Mean :41.38	Mean :22.5	Mean :24.22
3rd Qu.:45.00	3rd Qu.:32.5	3rd Qu.:30.00
Max. :55.00	Max. :65.0	Max. :40.00

Sujeto 13, Laberinto C



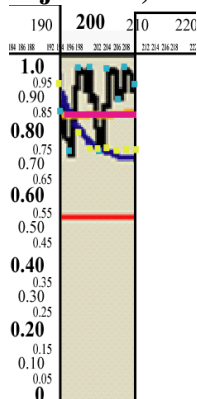
Sujeto 13, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. : 40.0	Min. : 0.00	Min. : 20.00
1st Qu.: 40.0	1st Qu.: 11.25	1st Qu.: 25.00
Median : 40.0	Median : 20.00	Median : 30.00
Mean : 42.5	Mean : 24.64	Mean : 38.10
3rd Qu.: 45.0	3rd Qu.: 30.00	3rd Qu.: 50.00
Max. : 55.0	Max. : 70.00	Max. : 75.00

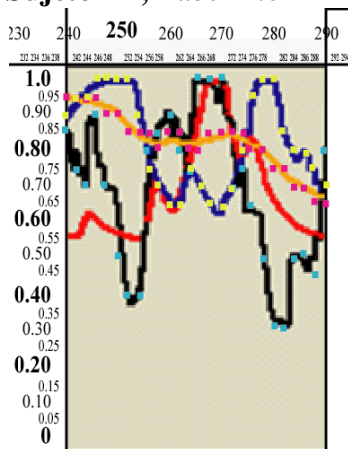
SUJETO 14

Sujeto 14, Laberinto A



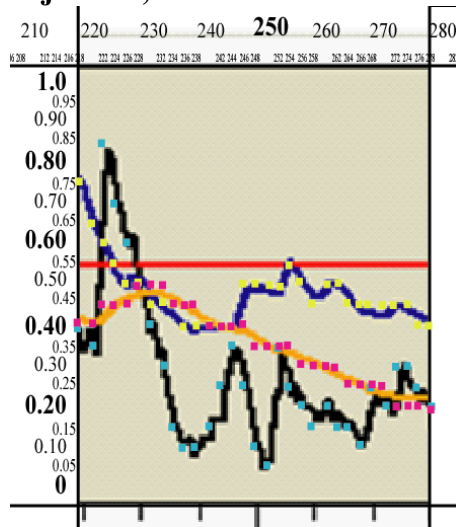
f	ie	Lte
Min. : 75.00	Min. : 10.00	Min. : 85
1st Qu.: 75.00	1st Qu.: 75.00	1st Qu.: 85
Median : 75.00	Median : 90.00	Median : 85
Mean : 78.89	Mean : 81.11	Mean : 85
3rd Qu.: 80.00	3rd Qu.: 100.00	3rd Qu.: 85
Max. : 95.00	Max. : 100.00	Max. : 85

Sujeto 14, Laberinto B



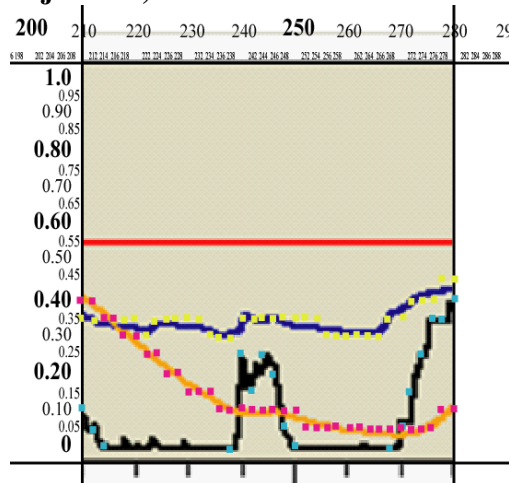
f	ie	Lte
Min. : 65.00	Min. : 30.00	Min. : 65.0
1st Qu.: 70.00	1st Qu.: 50.00	1st Qu.: 80.0
Median : 80.00	Median : 72.50	Median : 85.0
Mean : 82.88	Mean : 68.27	Mean : 82.5
3rd Qu.: 95.00	3rd Qu.: 83.75	3rd Qu.: 85.0
Max. : 100.00	Max. : 100.00	Max. : 95.0

Sujeto 14, Laberinto C



f	ie	Lte
Min. :40.00	Min. : 5.00	Min. :20.00
1st Qu.:45.00	1st Qu.:15.00	1st Qu.:27.50
Median :45.00	Median :25.00	Median :35.00
Mean :48.06	Mean :27.90	Mean :35.48
3rd Qu.:50.00	3rd Qu.:35.00	3rd Qu.:45.00
Max. :75.00	Max. :85.00	Max. :50.00

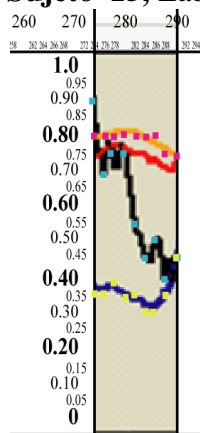
Sujeto 14, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. :30.00	Min. : 0.000	Min. : 5.00
1st Qu.:30.00	1st Qu.: 0.000	1st Qu.: 5.00
Median :35.00	Median : 0.000	Median :10.00
Mean :34.58	Mean : 7.194	Mean :14.17
3rd Qu.:35.00	3rd Qu.:11.250	3rd Qu.:20.00
Max. :45.00	Max. :40.000	Max. :40.00

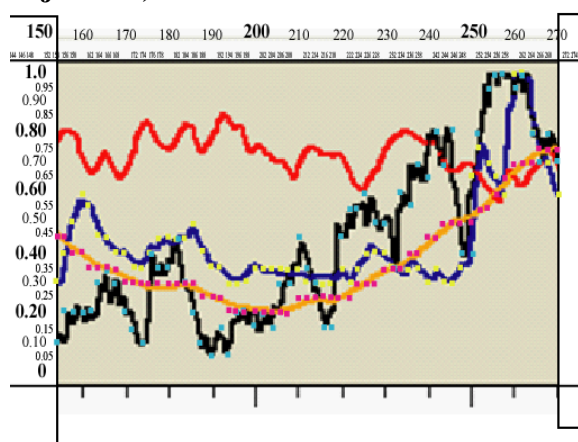
SUJETO 15

Sujeto 15, Laberinto A



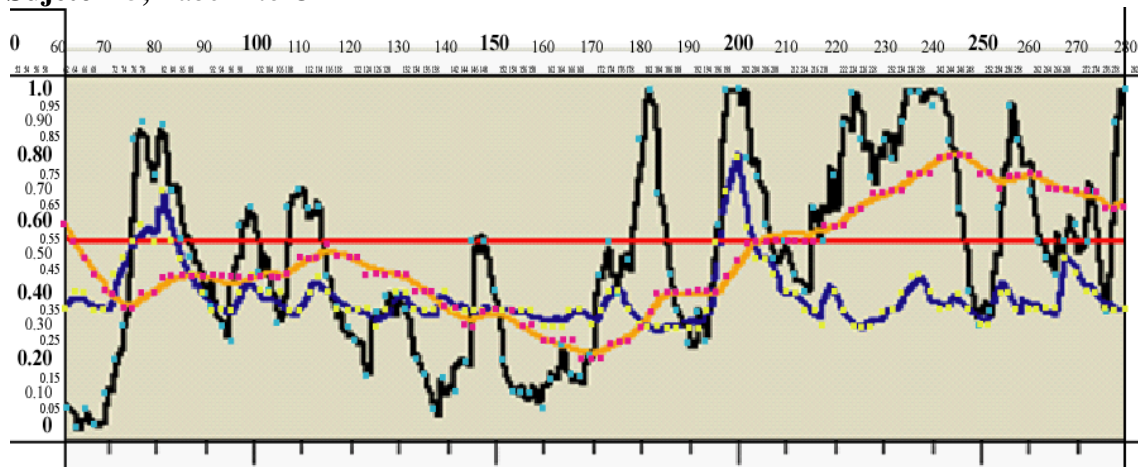
f	ie	Lte
Min. :30.00	Min. :40.00	Min. :75.00
1st Qu.:35.00	1st Qu.:45.00	1st Qu.:80.00
Median :35.00	Median :55.00	Median :80.00
Mean :35.56	Mean :60.56	Mean :78.89
3rd Qu.:35.00	3rd Qu.:75.00	3rd Qu.:80.00
Max. :45.00	Max. :90.00	Max. :80.00

Sujeto 15, Laberinto B



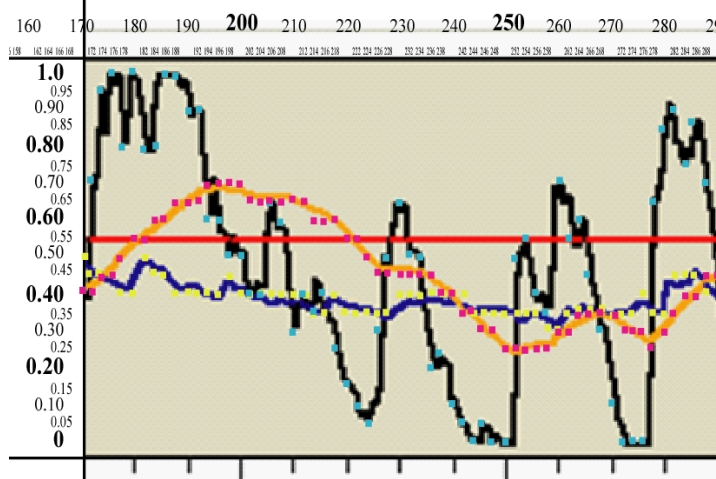
f	ie	Lte
Min. : 30.00	Min. : 5.00	Min. :20.00
1st Qu.: 35.00	1st Qu.: 20.00	1st Qu.:25.00
Median : 35.00	Median : 35.00	Median :30.00
Mean : 44.32	Mean : 43.05	Mean :37.71
3rd Qu.: 47.50	3rd Qu.: 62.50	3rd Qu.:45.00
Max. :100.00	Max. :100.00	Max. :75.00

Sujeto 15, Laberinto C



f	ie	Lte
Min. :30.00	Min. : 0.0	Min. :20.00
1st Qu.:35.00	1st Qu.: 30.0	1st Qu.:40.00
Median :35.00	Median : 50.0	Median :45.00
Mean :38.95	Mean : 50.5	Mean :49.86
3rd Qu.:40.00	3rd Qu.: 70.0	3rd Qu.:65.00
Max. :80.00	Max. :100.0	Max. :80.00

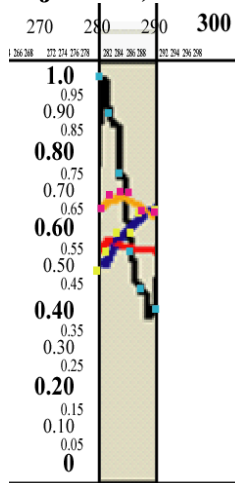
Sujeto 15, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. :30.00	Min. : 0.00	Min. :25.00
1st Qu.:35.00	1st Qu.: 25.00	1st Qu.:35.00
Median :40.00	Median : 50.00	Median :45.00
Mean :38.85	Mean : 48.03	Mean :46.07
3rd Qu.:40.00	3rd Qu.: 70.00	3rd Qu.:60.00
Max. :50.00	Max. :100.00	Max. :70.00

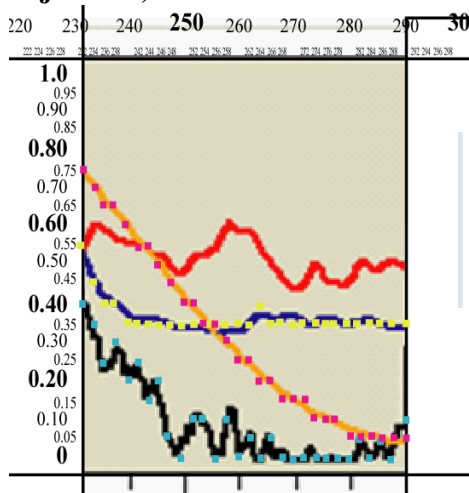
SUJETO 16

Sujeto 16, Laberinto A



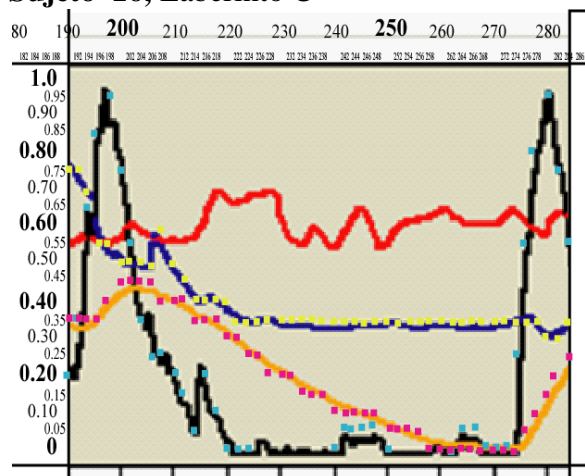
f	ie	Lte
Min. :50.00	Min. : 40.00	Min. :65.0
1st Qu.:56.25	1st Qu.: 47.50	1st Qu.:65.0
Median :60.00	Median : 65.00	Median :67.5
Mean :59.17	Mean : 67.50	Mean :67.5
3rd Qu.:63.75	3rd Qu.: 86.25	3rd Qu.:70.0
Max. :65.00	Max. :100.00	Max. :70.0

Sujeto 16, Laberinto B



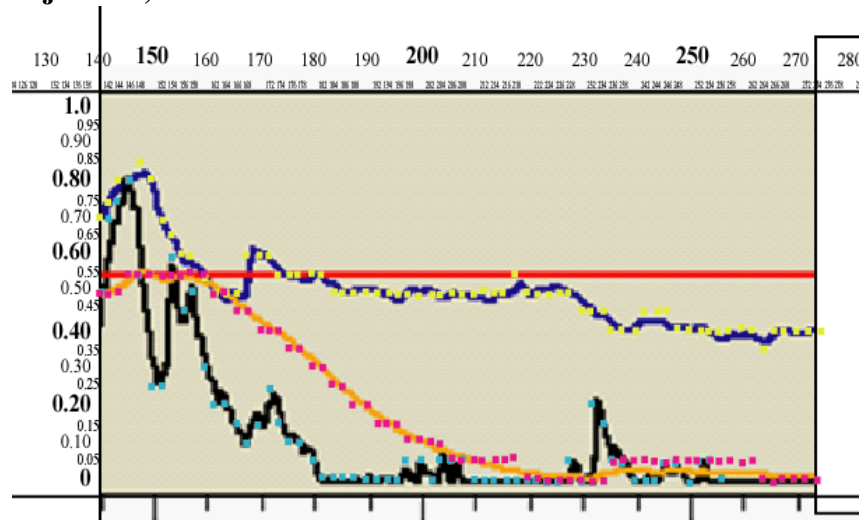
f	ie	Lte
Min. :35.0	Min. : 0.000	Min. : 5.00
1st Qu.:35.0	1st Qu.: 0.000	1st Qu.:10.00
Median :35.0	Median : 5.000	Median :25.00
Mean :36.5	Mean : 9.167	Mean :30.50
3rd Qu.:35.0	3rd Qu.:13.750	3rd Qu.:48.75
Max. :55.0	Max. :40.000	Max. :75.00

Sujeto 16, Laberinto C



f	ie	Lte
Min. :30.00	Min. : 0.00	Min. : 0.00
1st Qu.:35.00	1st Qu.: 0.00	1st Qu.: 5.00
Median :35.00	Median : 5.00	Median :17.50
Mean :40.73	Mean :20.83	Mean :19.69
3rd Qu.:41.25	3rd Qu.:27.50	3rd Qu.:35.00
Max. :75.00	Max. :95.00	Max. :45.00

Sujeto 16, Laberinto D



f	ie	Lte
Min. :35.00	Min. : 0.00	Min. : 0.00
1st Qu.:43.75	1st Qu.: 0.00	1st Qu.: 5.00
Median :50.00	Median : 5.00	Median : 5.00
Mean :51.25	Mean :12.21	Mean :19.34
3rd Qu.:55.00	3rd Qu.:15.00	3rd Qu.:40.00
Max. :85.00	Max. :80.00	Max. :55.00

LATAPIE VENEGAS IMELDA

Iztaccíhuatl 25, Hipódromo Condesa, México D.F. 06170, ibatnet@yahoo.com.mx

Nacionalidad: mexicana, fecha de nacimiento: 01, marzo, 1967.

FORMACIÓN:

Bachelor of Science in Computer Science, University of the People, (en proceso).

Diplomado en Desarrollo de Aplicaciones Móviles y Realidad Aumentada para las Plataformas iOS y Android, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Estado de México, (en proceso).

Maestría en Diseño, Nuevas Tecnologías, UAM Azcapotzalco. Medalla al Mérito.

Especialidad en Hipermedios, UAM Azcapotzalco. Medalla al Mérito.

Licenciatura en Diseño Gráfico, Universidad Simón Bolívar. Mención Honorífica.

Ingeniería en papel, ilustración y fotografía alternativa. Photoshop, Illustrator, Flash, Dreamweaver, Fireworks, Director y 3D Max. Action Script, Bases de datos, MySQL, Java, Python, HTML.

EXPERIENCIA PROFESIONAL:

Asesoría al proyecto de apoyo educativo a distancia de ASIAMEX.

Presentaciones digitales para: el Aniversario de la Caída del Muro de Berlín, UAM Azcapotzalco, Instituto Goethe y la Embajada de Alemania en México. MYC Computadoras, Turipack, Turipass, Farmacias El Fénix/Seguro Popular en el Estado de Puebla, Hélix, CalzaDIF, LN International Products Company, Arte e Inteligencia, Organización para el Desarrollo Familiar y Educativo A.C.

Portales de Internet para diferentes compañías.

En Ilustración: Ilustraciones realizadas para: Editorial Televisa (Revista Crecer Feliz), UNESCO, Editorial Santillana, Editorial CIDCLI entre otros. Ilustraciones Seleccionadas para diversas ediciones del Catálogo de ilustradores infantiles y juveniles, FONCA. Mención Honorífica en el V Catálogo de Ilustradores Infantiles y Juveniles, FONCA. Medalla de Bronce en el 8avo. Concurso Anual de Directores de Arte e Ilustradores 3D, USA.

Apoyos gráficos: Logotipos, empaques, imágenes, volantes y carteles para diversas compañías.